



تحلیل عوامل کلیدی موفقیت در پیاده سازی برنامه های ایمنی در پروژه های ساخت و ساز با

استفاده از DEMATEL (مطالعه موردی: صنعت نفت و گاز)

گروه ایمنی، بهداشت و محیط زیست، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

گروه مهندسی صنایع، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

شعله اسکات

مهناز زارعی*

چکیده مبسوط

مقدمه: ایمنی یکی از مؤلفه های اساسی و حیاتی در پروژه های ساخت و ساز محسوب می شود، به ویژه در صنایع حساس و پر ریسکی مانند نفت و گاز که وقوع حوادث می تواند پیامدهای جبران ناپذیری بر منابع انسانی، مالی و محیط زیستی داشته باشد. اجرای اثربخش برنامه های ایمنی، نه تنها از بروز سوانح جلوگیری می کند، بلکه موجب بهبود کیفیت، افزایش بهره وری و کاهش هزینه های پروژه نیز می گردد. با این رویکرد، هدف اصلی پژوهش حاضر شناسایی و ارزیابی عوامل کلیدی موفقیت در اجرای برنامه های ایمنی در پروژه های ساخت و ساز صنعت نفت و گاز است. در این راستا، شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است تا با بررسی عمیق تر شرایط و چالش های اجرایی، راهکارهای علمی و کاربردی برای بهبود عملکرد ایمنی ارائه شود.

مواد و روش ها: این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از منظر روش گردآوری داده ها، پیمایشی است و در بازه زمانی تیر تا شهریور ۱۴۰۳ انجام پذیرفت. به منظور جمع آوری داده های مورد نیاز، از ترکیب دو ابزار مصاحبه نیمه ساختاریافته و پرسش نامه استفاده شد. برای شناسایی عوامل اولیه، ابتدا به مرور نظام مند مطالعات پیشین در زمینه ایمنی پروژه های ساخت و ساز پرداخته شد. سپس این عوامل در قالب پرسش نامه ای طراحی و در اختیار خبرگان صنعت قرار گرفت. خبرگان از طریق روش نمونه گیری گلوله برفی انتخاب شدند، به گونه ای که ابتدا با چند متخصص دارای سابقه مستقیم در حوزه ایمنی مصاحبه شد و سپس با توصیه ایشان، سایر خبرگان مرتبط شناسایی و وارد مطالعه گردیدند. در این پژوهش، ابتدا عوامل کلیدی از طریق مطالعه تحقیقات پیشین شناسایی شده و سپس با استفاده از تکنیک دیمتل روابط بین این عوامل تحلیل شد. محاسبات مربوط به تجزیه و تحلیل داده ها نیز در نرم افزار اکسل انجام پذیرفت.

نتایج و بحث: یافته های تحلیل دیمتل نشان داد که در میان ابعاد اصلی شناسایی شده، دو بعد مشارکت کارکنان و مدیریت ایمنی به دلیل داشتن مشخصه عنوان عوامل علی شناخته شدند که نقشی تعیین کننده در جهت دهی به سایر مؤلفه ها دارند. در مقابل، سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی و تعهد ایمنی به عنوان عوامل معلول معرفی شدند که بیش ترین تأثیر را از سایر ابعاد دریافت می کنند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که تعهد ایمنی با ضریب اهمیت ۴/۱۷۷، نقش محوری و مهمی در موفقیت برنامه های ایمنی ایفا کرده و به عنوان مهم ترین مؤلفه در بین سایر عوامل مورد تأکید قرار گرفت. پس از آن نیز سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، مدیریت ایمنی، و مشارکت کارکنان به ترتیب با ضرایب اهمیت ۴/۱۵۴، ۳/۹۳۶ و ۳/۰۶۱ در رتبه های بعدی قرار گرفتند.

نتیجه گیری: این پژوهش با ارائه بینش های عملی و نظری، بر اهمیت توجه به تعهد سازمانی به ایمنی و تقویت فرهنگ مشارکت جویانه در بین کارکنان تأکید دارد. نتایج حاصل می تواند به مدیران، تصمیم گیرندگان و سیاست گذاران در حوزه ایمنی پروژه های نفت و گاز کمک کند تا با شناسایی نقاط کلیدی مداخله، به ارتقاء عملکرد ایمنی، کاهش ریسک ها و افزایش پایداری پروژه های ساخت و ساز بپردازند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

واژه های کلیدی: برنامه های

ایمنی، عوامل کلیدی موفقیت، پروژه های ساخت و ساز، روش دیمتل، صنعت نفت و گاز.

نویسنده مسئول: مهناز زارعی

نشانی: گروه مهندسی صنایع، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران. تلفن: ۰۹۱۷۷۱۶۱۲۹۸. پست الکترونیکی: mahnaz.zarei@iau.ac.ir

استناد: اسکات شعله، زارعی مهناز. تحلیل عوامل کلیدی موفقیت در پیاده سازی برنامه های ایمنی در پروژه های ساخت و ساز با استفاده از DEMATEL (مطالعه موردی صنعت نفت و گاز). پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۴: (۹) ۳-۱۷.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

در اقتصاد جهانی کنونی، شرکت‌ها ضمن تلاش برای حفظ شهرت سازمانی خود و در عین حال بهره‌وری بالا، تمایل بیشتری به رقابت دارند. در بیشتر موارد، جنبه‌های ناملموسی مانند سلامت و ایمنی نادیده گرفته می‌شوند و در نتیجه اغلب منابع برای این کارکردها در بودجه پروژه‌ها تخصیص داده نمی‌شوند. با افزایش هزینه‌های مرتبط با حوادث صنعتی در پروژه‌ها، سازمان‌ها شروع به ترویج توسعه برنامه‌های ایمنی کرده‌اند. صنعت ساخت‌وساز بخش مهمی است که زیرساخت‌ها و امکانات لازم را با هدف کمک به رفاه جامعه فراهم می‌کند. ارتباط و پیوندی قوی بین بخش ساخت‌وساز و سایر بخش‌ها وجود دارد. اهمیت این بخش با رشد سریع آن در سال‌های اخیر ثابت می‌شود، رشدی که کارشناسان انتظار دارند علی‌رغم تأثیر همه‌گیری بیماری کووید-۱۹ ادامه یابد (بونیا و همکاران ۲۰۲۱). به‌طور کلی صنعت ساخت‌وساز یک کارفرمای بزرگ نیروی کار است و در نتیجه توسعه اقتصادی و اجتماعی را ارتقا می‌دهد. صنعت ساخت و ساز در سال ۲۰۲۲ میلادی بیش از ۱۰ درصد از تولید ناخالص داخلی جهانی را تشکیل داده است (آگیکیوم و همکاران ۲۰۲۲). متأسفانه، علی‌رغم اهمیت آن، این صنعت عملکرد ایمنی ضعیفی دارد. آمارهای اولیه نشان می‌دهد که حدود ۷٪ از کارگران در سراسر جهان در صنعت ساخت‌وساز مشغول به کار هستند، اما آن‌ها ۴۰-۳۰٪ از تلفات در بخش‌های صنعتی را شامل می‌شوند. به‌عنوان مثال در کره جنوبی، ساخت‌وساز بالاترین نسبت (۲۵/۳٪) مرگ‌ومیر در محل کار را ثبت کرده است. محققان در مطالعات مختلف نشان داده‌اند که میزان مرگ‌ومیر در صنعت ساخت‌وساز بالاست. تأثیر منفی عملکرد ضعیف ایمنی با تأثیر بر زمان، هزینه و بهره‌وری نشان داده می‌شود. بنابراین، نیاز به اجرای یک برنامه ایمنی مؤثر برای بهبود عملکرد ایمنی وجود دارد (لی و همکاران ۲۰۱۸).

یک برنامه ایمنی به‌عنوان یک رویکرد پیشگیرانه به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای کاهش حوادث و صدمات در پروژه‌های ساخت‌وساز در نظر گرفته می‌شود (چای و همکاران ۲۰۲۲). یک برنامه ایمنی معقول نه‌تنها می‌تواند از صدمات شخصی جلوگیری کند، بلکه از دست دادن ماشین‌آلات و تجهیزات را نیز به حداقل می‌رساند. برای توسعه یک برنامه ایمنی مؤثر، عوامل مؤثر بر اجرای برنامه ایمنی باید شناسایی شوند. به‌خصوص با منابع محدود، شناسایی عوامل کلیدی موفقیت^۱ برای بهبود عملکرد ایمنی ضروری است. CSFهای مؤثر بر اجرای برنامه‌های ایمنی

به‌طور گسترده در حوزه پروژه‌های ساخت‌وساز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پشتیبانی مدیریت، آگاهی از ایمنی شخصی، ارتباطات و ایجاد کمیته‌های ایمنی به‌عنوان عوامل کلیدی موفقیت برای اجرای برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز شناسایی شده است (بونیا و همکاران ۲۰۲۱). با این حال، در بخش نفت و گاز تحقیقات کمی انجام شده است که نه‌تنها در ایران، بلکه در سایر کشورهای درحال توسعه نیز به‌طور فزاینده‌ای حیاتی است. یکی از دلایلی که نظارت بر برنامه‌های ایمنی در بخش نفت و گاز بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد این است که فعالیت‌های مرتبط با استخراج و فرآوری نفت و گاز به‌طور کلی به‌عنوان ریسک بالا در نظر گرفته می‌شود و نظارت مستمر را ضروری می‌سازد. رایج‌ترین شاخص ایمنی مورد استفاده در صنایع مختلف از جمله در پروژه‌های ساخت‌وساز نفت و گازی، تعداد جراحات و تلفات است (تانگ و همکاران ۲۰۱۷). صنعت نفت و گاز در ایران با چالش‌های زیادی مواجه است. رشد سریع این صنعت با فقدان تلاش برای ایمنی پروژه‌ها مواجه شده است که این موضوع منجر به پیشگیری ضعیف از حوادث می‌شود. پروژه‌های ساخت‌وساز در کشورهای درحال توسعه نیاز به اجرای یک برنامه ایمنی مؤثر، توسعه فرهنگ ایمنی و بهبود عملکرد ایمنی دارند. شرکت الف مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران یکی از مجریان توانمند در اجرای پروژه‌های ساخت‌وساز نفتی در منطقه جنوب کشور به حساب می‌آید. علیرغم اهمیت بالای برنامه‌های ایمنی، بسیاری از پروژه‌های ساخت‌وساز در این شرکت به دلایل مختلفی با چالش‌های جدی در استقرار این برنامه‌ها مواجه هستند. عدم شناخت دقیق و جامع از عوامل کلیدی موفقیت در پیاده‌سازی این برنامه‌ها یکی از چالش‌های اصلی این مجموعه است که می‌تواند منجر به ناکارآمدی برنامه‌های ایمنی و افزایش حوادث و خطرات شود. بنابراین با توجه به آنچه بیان شد هدف از این پژوهش ارائه رویکردی جهت شناسایی و ارزیابی روابط علی-معلولی عوامل کلیدی موفقیت در استقرار برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز در شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران است.

برنامه‌های ایمنی به مجموعه‌ای از اقدامات و رویه‌ها اطلاق می‌شود که به منظور جلوگیری از بروز بیماری‌ها و صدمات در محیط کار طراحی و اجرا می‌شوند. این برنامه‌ها نه‌تنها بر رفتارهای کارکنان تمرکز دارند، بلکه شامل نظارت و کنترل بر محیط کار، تجهیزات، شیوه‌های کاری و فعالیت‌های کارکنان نیز

۱- Critical success factors (CSFs)

تجهیزات به این مکان‌ها نقش کلیدی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های ایمنی دارند. در نتیجه، برای بهبود عملکرد و ایمنی در پروژه‌های نفت و گاز، ضروری است که برنامه‌های ایمنی با دقت و جامع طراحی و پیاده‌سازی شوند. توجه به نیازهای خاص هر پروژه و تحلیل جامع از خطرات و ریسک‌های موجود، می‌تواند به جلوگیری از حوادث و افزایش کارایی پروژه‌ها کمک شایانی نماید (ریداتسکینی و همکاران ۲۰۲۱). عوامل کلیدی موفقیت به مجموعه‌ای از ویژگی‌ها، شرایط و اقدامات اشاره دارد که به‌طور مستقیم بر توانایی یک سازمان برای دستیابی به اهداف و موفقیت تأثیر می‌گذارند. این عوامل به سازمان کمک می‌کنند تا در محیط پیچیده و رقابتی کسب‌وکار، عملکرد بهتری داشته باشد و به‌طور مؤثرتر از منابع و فرصت‌های موجود بهره‌برد (حکیم و همکاران ۲۰۲۳). به‌طور کلی، مطالعات پیشین عوامل مؤثر بر اجرای برنامه‌های ایمنی در صنعت ساخت‌وساز را بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، مؤسسه صنعت ساخت‌وساز اجزای کلیدی یک برنامه ایمنی مؤثر را شامل تعهد مدیریت، تأمین نیروی انسانی برای ایمنی، برنامه‌ریزی پیش پروژه، آموزش ایمنی، مشارکت کارکنان، شناسایی و پاداش ایمنی، تحقیقات حوادث، برنامه‌های مبارزه با سوء‌مصرف مواد و مدیریت پیمانکاران شناسایی کرده است (هاینزی ۲۰۰۲). هالوول و گامبازره (۲۰۰۹) کاهش فراوانی و شدت ریسک‌های ایمنی را ناشی از اجرای مستقل این اجزا دانسته و تأکید کردند که حمایت و تعهد مدیریت ارشد و انتخاب و مدیریت پیمانکاران از مؤثرترین عناصر برنامه ایمنی هستند. پینتو و همکاران (۲۰۱۱) نیز ارزیابی ریسک‌های شغلی را به‌عنوان اولین و کلیدی‌ترین مرحله در برنامه‌ریزی ایمنی معرفی کردند. هالوول و کالهن (۲۰۱۱) با استفاده از رویکرد دلفی، نقش حیاتی مدیر ایمنی سایت، مشارکت کارگران، برنامه ایمنی خاص سایت و حمایت مدیریت ارشد را در موفقیت برنامه‌های ایمنی تأیید کردند. باوفا و همکاران (۲۰۱۸) نیز پنج عامل کلیدی شامل تعهد و مسئولیت‌های ایمنی، انتخاب پیمانکاران و کارکنان، نظارت ایمنی، برنامه ایمنی و مشارکت کارکنان را به‌عنوان عوامل مؤثر در اجرای برنامه‌های ایمنی اولویت‌بندی کردند. در نهایت، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، ۲۲ عامل کلیدی موفقیت را در چهار دسته مشارکت کارکنان، سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، مدیریت ایمنی و تعهد ایمنی شناسایی نمودند. این مطالعات نشان می‌دهند که اجرای مؤثر برنامه‌های ایمنی نیازمند ترکیبی از تعهد مدیریت، مشارکت کارکنان، آموزش و ارزیابی مستمر ریسک‌ها است. در جدول ۱ فهرست عوامل مؤثر کلیدی در استقرار موفقیت‌آمیز برنامه‌های ایمنی گزارش شده است.

هستند. هدف اصلی این برنامه‌ها کاهش حوادث، صدمات و خسارات در محل کار و ایجاد یک محیط کاری ایمن‌تر است (بونیا و همکاران ۲۰۲۱). یک برنامه ایمنی مؤثر باید شامل ارزیابی مستمر شرایط کار، شناسایی خطرات و اتخاذ تدابیر مناسب برای کاهش آن‌ها باشد. برنامه‌های ایمنی باید رفتارهای خطرناک را که ممکن است منجر به بروز حوادث شوند، کاهش دهند و همچنین به شناسایی و گزارش مسائل و صدمات ایمنی کمک کنند. در صنعت ساخت‌وساز، اجرای برنامه‌های ایمنی اهداف خاصی را دنبال می‌کند. این اهداف شامل جلوگیری از رفتارهای نامناسب که ممکن است منجر به حوادث شوند، اطمینان از شناسایی و گزارش مشکلات ایمنی و تضمین ثبت و حل حوادث به‌طور مؤثر است. به‌عبارت دیگر، برنامه‌های ایمنی باید به گونه‌ای طراحی شوند که فاصله بین ایمنی واقعی و ایمنی هدف را کاهش دهند (چای و همکاران ۲۰۲۲). برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های نفت و گاز به‌عنوان عناصر حیاتی برای حفاظت از کارکنان، دارایی‌ها و محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شوند. این برنامه‌ها به دلیل ماهیت پرخطر عملیات نفت و گاز که با مواد قابل اشتعال، سمی و انفجاری سر و کار دارند، به‌طور ویژه طراحی شده‌اند تا ریسک‌های ناشی از حوادث احتمالی را کاهش دهند. سیستم‌های ایمنی در این زمینه نقش بسزایی دارند، زیرا به‌عنوان موانع حفاظتی عمل می‌کنند و شامل انواع مختلفی از سیستم‌ها مانند سیستم‌های توقف اضطراری هستند که در صورت شناسایی شرایط بحرانی، به‌طور فوری کل فرآیند را متوقف می‌کنند. این اقدام به جلوگیری از بروز حوادث جدی و کاهش خطرات جدی در عملیات نفت و گاز کمک می‌کند. مرحله کلیدی در اجرای موفق برنامه‌های ایمنی، تدوین مشخصات نیازمندی‌های ایمنی است. این سند تخصصی شامل نیازهای عمومی برای سیستم‌های ایمنی می‌باشد و در مراحل مختلف پروژه، به‌ویژه در مرحله طراحی مهندسی، باید به دقت پیگیری شود. در مطالعه‌ای که بر روی حوادث در صنعت نفت و گاز انجام شده است، مشخص شده که نقص در مشخصات نیازمندی‌ها منجر به بروز حوادث و سطح ایمنی ناکافی در سیستم‌های خودکار طراحی‌شده، شده است. در واقع، تقریباً نیمی از موارد مورد بررسی به ناکارآمدی‌ها در این مرحله نسبت داده شده‌اند. علاوه بر این، چالش‌های جدیدی که به دلیل انتقال عملیات به مکان‌های دورافتاده و با دسترسی سخت به‌وجود آمده است، نیاز به توجه ویژه به برنامه‌های ایمنی را افزایش می‌دهد. در این محیط‌ها، نگهداری و خدمات‌دهی به تجهیزات و سیستم‌های ایمنی بسیار حیاتی است. تیم‌های نگهداری به‌صورت شیفتی به این مناطق منتقل می‌شوند تا آزمایش‌ها و نگهداری‌های لازم را انجام دهند. در این شرایط، هزینه‌های حمل‌ونقل و لجستیک برای ارسال کارکنان و

جدول ۱- عوامل کلیدی موفقیت در استقرار برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز

عوامل اصلی	عوامل فرعی	رفرنس
مشارکت کارکنان	نگرش شخصی	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، چای و همکاران (۲۰۲۲)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، الروقی و همکاران (۲۰۱۹)
	انگیزه	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	جلسات ایمنی	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، چای و همکاران (۲۰۲۲)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، الروقی و همکاران (۲۰۱۹)، محمدی و همکاران (۲۰۱۸)
	کمیته ایمنی	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی	مشارکت مداوم	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	طرح اجرایی	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	آموزش	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، چای و همکاران (۲۰۲۲)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، الروقی و همکاران (۲۰۱۹)، محمدی و همکاران (۲۰۱۸)
	تجهیزات و نگهداری	بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، بونیا و همکاران (۲۰۲۳)
مدیریت ایمنی	ارزیابی برنامه	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، چای و همکاران (۲۰۲۲)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	برنامه‌ریزی پیش از کار	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	برای ایمنی	
	ارتباطات	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، چای و همکاران (۲۰۲۲)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، الروقی و همکاران (۲۰۱۹)، محمدی و همکاران (۲۰۱۸)
تعهد ایمنی	تخصیص اختیارات و مسئولیت‌ها	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	تخصیص منابع مناسب	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	شناسایی خطرات	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	حمایت مدیریت	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، چای و همکاران (۲۰۲۲)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، الروقی و همکاران (۲۰۱۹)، باوفا و همکاران (۲۰۱۸)
سیاست‌های ایمنی	کار تیمی	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)
	اهداف واضح و واقعی	بونیا و همکاران (۲۰۲۳)، چای و همکاران (۲۰۲۲)، بونیا و همکاران (۲۰۲۱)، الروقی و همکاران (۲۰۱۹)، باوفا و همکاران (۲۰۱۸)

در زمینه برنامه‌های ایمنی، تحقیقات متعددی در سالیان اخیر ارائه شده‌اند. به‌عنوان مثال باوفا و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به شناسایی و ارزیابی عوامل کلیدی برای اجرای مؤثر برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش دلفی فازی، ۱۱ عامل برنامه ایمنی را شناسایی کردند و سپس با روش دیمتل^۲ این عوامل را تجزیه و تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که پنج عامل شامل تعهد و مسئولیت‌های ایمنی، انتخاب پیمانکاران فرعی و کارکنان، ناظر و متخصصان ایمنی، طرح ایمنی و مشارکت کارکنان و ارزیابی ایمنی، از عوامل حیاتی در برنامه‌های ایمنی هستند. آن‌ها تأکید کردند که تمرکز بر این پنج عامل می‌تواند به بهبود کلی برنامه‌های ایمنی منجر شود. در ادامه، بونیا و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی دیگر به شناسایی

عوامل کلیدی ایمنی در اجرای برنامه‌های مدیریت جامع ایمنی در صنعت ساخت و ساز عراق پرداختند. آن‌ها با استفاده از تحلیل عاملی اکتشافی، عوامل کلیدی ایمنی را به چهار دسته اصلی شامل مشارکت کارکنان، سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، مدیریت ایمنی و تعهد مدیریت طبقه‌بندی کردند. سپس با به‌کارگیری مدل‌سازی معادلات ساختاری، ارتباط بین اجرای برنامه‌های ایمنی و موفقیت کلی پروژه را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که اجرای برنامه‌های ایمنی تأثیر مثبت و قابل توجهی بر موفقیت پروژه دارد و بهبود عملکرد ایمنی می‌تواند به دستیابی به سایر اهداف پروژه نیز کمک کند. در پژوهشی دیگر، بونیا و همکاران (۲۰۲۱) به شناسایی و ارزیابی موانع اجرای برنامه‌های ایمنی در صنعت ساخت‌وساز پرداختند. آن‌ها با استفاده

تحقیق نشان داد که کاهش این موانع می‌تواند به بهبود شیوه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز کمک کند. اوفوری و همکاران (۲۰۲۳) نیز در مطالعه‌ای به بررسی شیوه‌های ایمنی و عملکرد صنعت نفت، گاز و انرژی در غنا پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری، آموزش ایمنی را به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر عملکرد ایمنی شناسایی کردند و نشان دادند که این عامل از طریق دانش ایمنی و فرهنگ ایمنی تأثیرگذار است. با این حال، نتایج نشان داد که آموزش ایمنی تأثیر قابل‌توجهی بر رعایت ایمنی ندارد. در نهایت، وقار و همکاران (۲۰۲۴) به شناسایی و ارزیابی عوامل اصلی ایمنی که به حوادث در پروژه‌های ساخت‌وساز پایین‌دستی نفت و گاز در مالزی منجر می‌شوند، پرداختند. آن‌ها با استفاده از تحلیل عاملی اکتشافی و مدل‌سازی معادلات ساختاری، عواملی مانند آموزش ایمنی ناکافی، رویه‌های ایمنی نامناسب و نظارت ناکافی را به‌عنوان عوامل بحرانی شناسایی کردند. کیوم و همکاران (۲۰۲۴) نیز در مطالعه‌ای به بررسی مدیریت بهداشت و ایمنی مبتنی بر فناوری برای کنترل شیوع بیماری در کارگاه‌های ساخت‌وساز پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری، روابط بین اقدامات بهداشت و ایمنی، چالش‌های اجرایی و فناوری‌های نوآورانه را در طول پاندمی کرونا تحلیل کردند و نشان دادند که فناوری‌های نوآورانه می‌توانند به تحول مدیریت بهداشت و ایمنی کمک کنند. با مرور ادبیات پژوهش‌های داخلی و خارجی، مشخص می‌شود که تحقیقات قابل‌توجهی در زمینه شناسایی عوامل کلیدی موفقیت در حوزه‌های ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست انجام شده است. با این حال، شکاف‌های مهمی مانند کمبود تحقیقات در تحلیل روابط علی-معلولی بین عوامل، محدودیت در بررسی صنایع حساس‌تر مانند نفت و گاز و فقدان تمرکز بر استقرار عملیاتی برنامه‌های ایمنی وجود دارد. این پژوهش با تمرکز بر تحلیل روابط علی-معلولی بین عوامل کلیدی موفقیت و بررسی این عوامل در پروژه‌های نفت و گاز، به‌ویژه با استفاده از روش دیمتل، می‌تواند به درک عمیق‌تری از چالش‌های ایمنی و ارائه راهکارهای عملیاتی برای بهبود مدیریت ایمنی در صنایع حساس کمک کند.

از تحلیل عاملی اکتشافی، دوازده مانع اصلی را شناسایی و این موانع را در چهار بعد جو کاری غیرمساعد، مدیریت ضعیف، آگاهی پایین نسبت به ایمنی و هنجارهای غیرحمایتی صنعت دسته‌بندی کردند. سپس با به‌کارگیری مدل‌سازی معادلات ساختاری، تأثیر این موانع بر اجرای برنامه‌های ایمنی را تأیید کردند. نتایج نشان داد که هر چهار بعد موانع به‌طور قابل‌توجهی بر اجرای برنامه‌های ایمنی تأثیر منفی می‌گذارند. چای و همکاران (۲۰۲۲) نیز در پژوهشی به شناسایی عوامل کلیدی موفقیت برای اجرای برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های بازسازی ساخت‌وساز صنعتی متروکه پرداختند. آن‌ها با استفاده از تکنیک دیمتل فازی، مؤلفه‌هایی مانند پشتیبانی مدیریت، تخصیص اختیار و مسئولیت، کنترل پیمانکار فرعی، نگرش شخصی و بازرسی‌های ایمنی و ارزیابی خطر را به‌عنوان عوامل کلیدی موفقیت شناسایی کردند. بونیا و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای دیگر به توسعه یک مدل برای موفقیت پروژه در صنعت ساخت‌وساز از طریق بررسی تأثیر مستقیم و غیرمستقیم عوامل کلیدی موفقیت ایمنی پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری، ۲۰ عامل کلیدی را در چهار گروه تهدید مدیریت و مشارکت کارکنان، تجزیه و تحلیل محل کار، کنترل خطر و پیشگیری و آموزش بهداشت و ایمنی طبقه‌بندی کردند. نتایج نشان داد که ارتباط بین عوامل کلیدی موفقیت ایمنی و موفقیت کلی پروژه توسط عامل میانجی برنامه ایمنی تأیید می‌شود. آکا و همکاران (۲۰۲۳) نیز در پژوهشی به ارزیابی اثربخشی استراتژی‌ها برای اجرای برنامه‌های ایمنی و بهداشت در کارگاه‌های ساخت‌وساز پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش آنالیز رگرسیون چندگانه، شش استراتژی مناسب برای فعال‌سازی سطوح مطلوب اجرای برنامه‌های ایمنی و بهداشت را شناسایی کردند و تأکید کردند که راه‌اندازی نهادهای قانونی برای ارتقای آگاهی و استانداردسازی می‌تواند به کاهش تصادفات و حوادث در پروژه‌ها کمک کند. ال‌اوتایی و کینبر (۲۰۲۳) در تحقیقی به شناسایی و ارزیابی موانع پذیرش برنامه‌های بهداشت و ایمنی در صنعت ساخت‌وساز عربستان سعودی پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری، چهار مانع اصلی شامل حکمرانی ضعیف، آگاهی پایین ایمنی، شرایط کاری نامناسب و استانداردهای نامساعد صنعت را شناسایی کردند. نتایج این

مواد و روش‌ها

تشکیل کمیته خبرگی، از روش نمونه‌گیری گلوله برفی بهره گرفته شد که براساس مصاحبه با افراد متخصص و شناسایی سایر خبرگان از طریق توصیه‌های آن‌ها صورت پذیرفت. جامعه آماری این پژوهش شامل کلیه خبرگان فعال در حوزه ایمنی در شرکت

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش جمع‌آوری داده‌ها، پیمایشی است و در بازه زمانی تیرماه تا شهریور ۱۴۰۳ انجام شد. برای گردآوری اطلاعات، از دو ابزار اصلی شامل مصاحبه و پرسشنامه مبتنی بر روش دیمتل استفاده شد. به‌منظور

مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران بود. معیارهای انتخاب خبرگان شامل سابقه کاری مرتبط، سطح تحصیلات و پست سازمانی آن‌ها در نظر گرفته شد. مشخصات و ویژگی‌های اعضای کمیته خبرگی به‌طور کامل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- اطلاعات اعضای کمیته خبرگی

ویژگی	توضیحات	تعداد	درصد
جنسیت	مرد	۱۱	۷۳٪
	زن	۴	۲۷٪
سن (سال)	<۳۰	۴	۲۷٪
	۳۰-۴۰	۶	۴۰٪
	۴۱-۵۰	۳	۲۰٪
	>۵۰	۲	۱۳٪
تحصیلات	کارشناسی	۵	۳۳٪
	کارشناسی ارشد	۸	۵۳٪
	دکتری	۳	۲۰٪
موقعیت سازمانی	مدیر ارشد	۶	۴۰٪
	مدیر میانی	۶	۴۰٪
	کارشناس	۳	۲۰٪
تجربه (سال)	<۵	۳	۲۰٪
	۵-۱۰	۴	۲۷٪
	۱۱-۲۰	۶	۴۰٪
	>۲۰	۲	۱۳٪

دارد. این روش به‌طور مؤثر تأثیرات متقابل، شامل تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم میان عوامل را تحلیل کرده و روابط علت و معلولی را به وضوح شناسایی می‌کند. همچنین، از طریق ماتریس روابط تأثیر، ارتباط بین عوامل را به‌صورت بصری نمایش می‌دهد که به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا درک بهتری از تأثیرات متقابل عوامل داشته باشد. علاوه بر این، دیمتل نه تنها برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده می‌شود، بلکه در شناسایی معیارهای ارزیابی کلیدی و تعیین وزن آن‌ها نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. به‌طور کلی گام‌های روش دیمتل به شرح زیر می‌باشد (سی و همکاران، ۲۰۱۸).

در ادبیات پژوهش، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره متعددی برای حل مسائل تصمیم‌گیری گروهی توسعه یافته‌اند که در این میان، تکنیک دیمتل به‌عنوان یک روش قدرتمند برای تحلیل روابط متقابل بین عوامل شناخته می‌شود. این تکنیک قادر است روابط پیچیده بین عوامل را به یک مدل ساختاری قابل‌فهم تبدیل کرده و آن‌ها را به دو گروه علت و معلول تقسیم کند. این ویژگی، دیمتل را به ابزاری کاربردی برای تحلیل سیستم‌های پیچیده تبدیل می‌کند، چرا که نه تنها امکان رتبه‌بندی عوامل را فراهم می‌کند، بلکه حوزه‌های بهبود را نیز برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک بلندمدت شناسایی می‌نماید. در مقایسه با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، دیمتل مزایای قابل‌توجهی

جدول ۳- مقادیر عددی شدت اثرگذاری در روش دیمتل

عبارت کلامی	مقدار عددی
تأثیر بسیار زیاد	۴
تأثیر زیاد	۳
تأثیر کم	۲
تأثیر بسیار کم	۱
عدم وجود تأثیر	۰

به‌صورت $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ و گروه تصمیم‌گیری شامل l خبره به‌صورت $E = \{E_1, E_2, \dots, E_l\}$ در نظر گرفته می‌شود.

گام ۱: تشکیل ماتریس تأثیر ارتباط مستقیم گروهی: برای ارزیابی روابط بین n عامل در یک سیستم، مجموعه عوامل

از این خبرگان خواسته می‌شود میزان تأثیر مستقیم عامل F_i بر عامل F_j را براساس یک مقیاس عددی ۵ درجه‌ای مطابق با جدول ۳ ارزیابی کنند. سپس، ماتریس تأثیر مستقیم فردی $Z_k = [z_{ij}^k]_{n \times n}$ که توسط خبره k ارائه می‌شود، تشکیل می‌گردد، به‌طوری‌که تمامی عناصر قطر اصلی ماتریس برابر صفر هستند و

$$z_{ij} = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l z_{ij}^k, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (۱)$$

بر همین اساس فرم ریاضی ماتریس تأثیر مستقیم گروهی Z براساس رابطه ۲ نتیجه می‌گردد:

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & 0 & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

روابط ۳ و ۴ محاسبه کرد. این نرمال‌سازی معمولاً با استفاده از حداکثر مجموع سطری عناصر ماتریس Z انجام می‌شود.

$$X = \frac{Z}{s}, \quad (۳)$$

$$s = \max \left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n z_{ij}, \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{i=1}^n z_{ij} \right) \quad (۴)$$

گام ۳: محاسبه ماتریس تأثیر کل: با استفاده از ماتریس تأثیر مستقیم نرمال‌شده X ، ماتریس تأثیر کل $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ از طریق جمع تأثیرات مستقیم و تمامی تأثیرات غیرمستقیم محاسبه می‌شود. این محاسبه معمولاً با استفاده از رابطه ۵ انجام می‌شود:

$$T = \lim_{h \rightarrow \infty} (X + X^2 + X^3 + \dots + X^h) = X(I - X)^{-1} \quad (۵)$$

همه عناصر موجود در ماتریس X از رابطه $0 \leq x_{ij} < 1$ و $0 \leq \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1$ تبعیت می‌کنند و حداقل یک مقدار i وجود دارد که در آن شرط $\sum_{j=1}^n z_{ij} \leq s$ برقرار است.

به طوری‌که I بیانگر ماتریس همانی است. بر همین اساس فرم ریاضی ماتریس تأثیر کل T براساس رابطه ۶ نشان داده می‌شود:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nn} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

تأثیر کل T را نشان می‌دهند، با استفاده از روابط ۷ و ۸ نتیجه می‌شوند:

گام ۴: ترسیم نمودار تأثیر رابطه: در این مرحله بردارهای R و C که به ترتیب مجموع سطرها و مجموع ستون‌های ماتریس

$$R = [r_i]_{n \times 1} = \left\{ \sum_{j=1}^n t_{ij} \right\}_{n \times 1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$C = [c_j]_{1 \times n} = \left\{ \sum_{i=1}^n t_{ij} \right\}_{1 \times n} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

اگر مقدار $(r_i - c_j)$ مثبت باشد، عامل F_i به عنوان تأثیرگذار قطعی و یک متغیر علت است. زمانی که این مقدار منفی باشد، متغیر به عنوان یک تأثیرپذیر قطعی و معلول است. این مقدار رابطه نامیده می‌شود. در نهایت یک نمودار در دستگاه مختصات دکارتی ترسیم می‌شود که در آن محور طولی مقدار تأثیر $(r_i + c_j)$ و محور عرضی براساس مقدار رابطه $(r_i - c_j)$ است؛ بنابراین موقعیت هر عامل با نقطه‌ای به مختصات $(r_i + c_j, r_i - c_j)$ در دستگاه معین می‌شود. به دلیل مشخص شدن پارامترها در این نمودار از جنبه علت و معلولی، آن را نمودار علی نیز می‌نامند. نمودار تأثیر-رابطه فقط روابط بین عواملی را نشان می‌دهد که شرط رابطه ۹ را برآورده می‌کند.

$$t_{ij} > \theta; \forall i, j \quad (9)$$

در اینجا، r_i مجموع درایه‌های سطر i ام در ماتریس T است و مجموع تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم ناشی از عامل F_i به سایر عوامل را نشان می‌دهد. به طور مشابه، مجموع c_j درایه‌های ستون j ام ماتریس T است که مجموع تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم دریافتی از سایر عوامل توسط عامل F_j را نمایان می‌سازد. اگر $i = j$ و $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ؛ $(r_i + c_j)$ شاخصی است که مجموع تأثیر گذاشته و گرفته شده توسط عامل F_i را نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر $(r_i + c_j)$ نشان‌دهنده درجه اهمیتی است که عامل F_i در سیستم دارد. این مقدار را برتری یا تأثیر می‌نامند. مقدار $(r_i - c_j)$ نشان‌دهنده تأثیر خالصی است که عامل F_i در سیستم به اشتراک گذاشته و با آن در تعامل است.

به طوری که θ بیانگر حد آستانه است و براساس نظرات خبرگان و یا رابطه ۱۰ تعیین می‌گردد:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}}{n^2} \quad (10)$$

نتایج و بحث

شامل مشارکت کارکنان (C_1)، سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی (C_2)، مدیریت ایمنی (C_3) و تعهد ایمنی (C_4) با استفاده از مقیاس پنج‌درجه‌ای دیمتل ارزیابی کنند. در نهایت، میانگین حسابی نظرات کمیته خبرگی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه و نتایج در قالب ماتریس ارتباط مستقیم در جدول ۴ نمایش داده شد.

به منظور تحلیل و تعیین روابط علی- معلولی بین عوامل کلیدی موفقیت در استقرار برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز، از روش دیمتل مبتنی بر گروهی استفاده شده است. پس از توزیع پرسش‌نامه میان اعضای کمیته خبرگی، از خبرگان خواسته شد تا نقطه نظرات خود را در رابطه با مقایسات زوجی بین عوامل اصلی

جدول ۴ - ماتریس ارتباط مستقیم عوامل اصلی

	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۰۰	۰/۳۳۳
C_2	۰/۱۶۷	۰/۰۰۰	۰/۵۰۰	۱/۵۰۰
C_3	۰/۵۰۰	۱/۳۳۳	۰/۰۰۰	۱/۳۳۳
C_4	۰/۶۶۷	۰/۵۰۰	۰/۳۳۳	۰/۰۰۰

تمامی درایه‌های ماتریس ارتباط مستقیم ضرب گردید تا ماتریس ارتباط مستقیم نرمال حاصل شود. نتایج مربوط به این مرحله، شامل ماتریس ارتباط مستقیم نرمال برای عوامل اصلی، در جدول ۵ ارائه شده است.

در مرحله بعد، با استفاده از روابط ۳ و ۴، بیش‌ترین مقدار حاصل از مجموع سطری و ستونی در ماتریس ارتباط مستقیم محاسبه شد که برابر با ۳/۱۷۰ بود. سپس، معکوس این مقدار (۰/۳۱۶) در

جدول ۵- ماتریس ارتباط مستقیم نرمال عوامل اصلی

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	۰/۰۰۰	۰/۳۱۶	۰/۱۵۸	۰/۱۰۵
C ₂	۰/۰۵۳	۰/۰۰۰	۰/۱۵۸	۰/۴۷۴
C ₃	۰/۱۵۸	۰/۴۲۱	۰/۰۰۰	۰/۴۲۱
C ₄	۰/۲۱۱	۰/۱۵۸	۰/۱۰۵	۰/۰۰۰

نتایج این محاسبات که براساس نظرات کمیته خبرگی به‌دست آمده‌اند، در جدول ۶ نمایش داده شده است.

سپس براساس ماتریس ارتباط مستقیم نرمال و با استفاده از روابط ۵ و ۶، ماتریس ارتباط کامل محاسبه شد. این ماتریس نشان‌دهنده تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم میان عوامل مورد بررسی است.

جدول ۶- ماتریس ارتباط کامل عوامل اصلی

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	۰/۲۰۶	۰/۶۱۶	۰/۳۴۷	۰/۵۶۵
C ₂	۰/۳۰۳	۰/۳۷۶	۰/۳۵۳	۰/۸۳۲
C ₃	۰/۴۶۶	۰/۸۶۱	۰/۳۱۶	۱/۰۱۱
C ₄	۰/۳۵۱	۰/۴۳۸	۰/۲۶۷	۰/۳۵۷

می‌دهد، با استفاده از رابطه ۸ تعیین شد. سپس مقادیر $(r+c)$ که بیانگر اهمیت کلی هر عامل در سیستم است و $(r-c)$ که نقش علی یا معلولی هر عامل را مشخص می‌کند، برای تمامی عوامل محاسبه گردید. نتایج این تحلیل در جدول ۷ ارائه شده است.

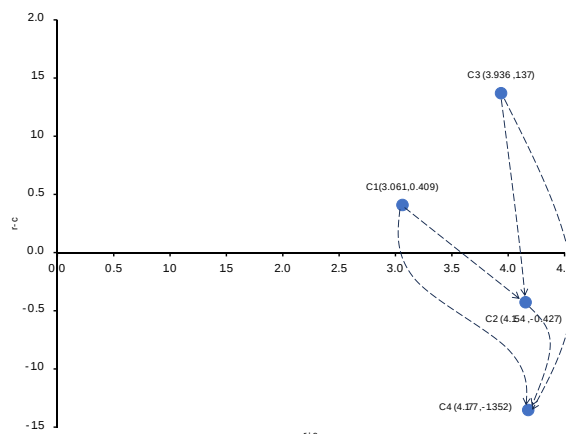
در گام بعد با استفاده از ماتریس ارتباط کامل، جمع عناصر هر سطر (r) که نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری هر عامل بر سایر عوامل است، از طریق رابطه ۷ محاسبه گردید. همچنین، جمع عناصر هر ستون (c) که میزان تأثیرپذیری هر عامل را نشان

جدول ۷- میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری عوامل اصلی

عوامل اصلی	علائم	r	c	$r+c$	$r-c$
مشارکت کارکنان	C ₁	۱/۷۳۵	۱/۳۲۶	۳/۰۶۱	۰/۴۰۹
سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی	C ₂	۱/۸۶۴	۲/۲۹۰	۴/۱۵۴	-۰/۴۲۷
مدیریت ایمنی	C ₃	۲/۶۵۳	۱/۲۸۳	۳/۹۳۶	۱/۳۷۰
تعهد ایمنی	C ₄	۱/۴۱۳	۲/۷۶۵	۴/۱۷۷	-۱/۳۵۲

کامل از حد آستانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده وجود ارتباط معنادار بین عوامل مربوطه خواهد بود. نمودار تأثیر-رابطه بین عوامل اصلی موفقیت در اجرای برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت و ساز شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران مطابق با شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.

در گام پایانی، برای شناسایی روابط درونی بین عوامل اصلی، مقدار حد آستانه براساس میانگین کلبه درایه‌های ماتریس ارتباط کامل (جدول ۶) با بهره‌گیری از روابط ۹ و ۱۰ تعیین شد. این مقدار که برابر با ۰/۴۷۹ است، به‌عنوان مبنای تشخیص ارتباط میان عوامل استفاده گردید. در صورتی که مقدار هر درایه در ماتریس ارتباط



شکل ۱- نمودار تأثیر- رابطه عوامل اصلی

اجرای برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت و ساز شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران به خود اختصاص داده است. سایر مؤلفه‌ها، از جمله سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، مدیریت ایمنی و مشارکت کارکنان، به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. به همین ترتیب، روابط علی-معلولی بین زیرعوامل هر یک از ابعاد اصلی نیز تعیین و در ادامه در جدول ۸ توضیح داده شده‌اند.

همان‌طور که از شکل ۱ نتیجه می‌شود در بین ابعاد اصلی، مشارکت کارکنان (C_1) و مدیریت ایمنی (C_3) به دلیل دارا بودن مقادیر مثبت ($r-C$) به عنوان عوامل علی (تأثیرگذار) نتیجه شدند. در مقابل، سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی (C_2) و تعهد ایمنی (C_4) با مقادیر منفی ($r-C$) به عنوان عوامل معلول (تأثیرپذیر) تعیین شده‌اند. علاوه بر این، تعهد ایمنی با بالاترین مقدار ($r+C$)، بیشترین ضریب اهمیت را در میان عوامل کلیدی موفقیت در

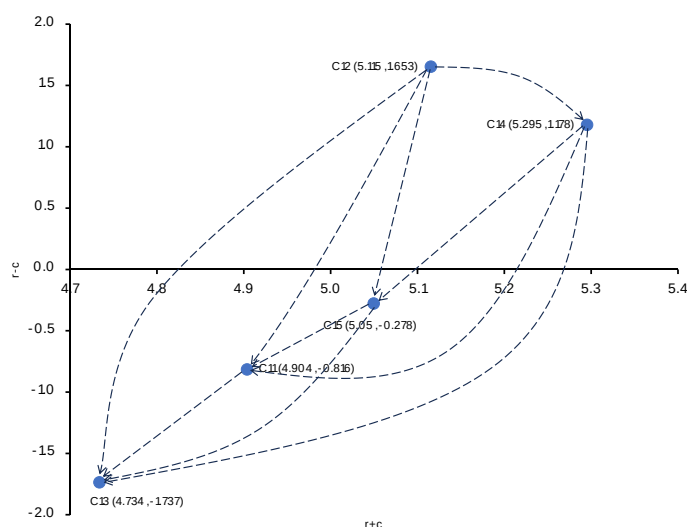
جدول ۸- میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری عوامل فرعی

عوامل اصلی	عوامل فرعی	علائم	r	c	$r+c$	$r-c$	رتبه در گروه	دسته
مشارکت کارکنان (C_1)	نگرش شخصی	C_{11}	۲/۰۴۴	۲/۸۶۰	۴/۹۰۴	-۰/۸۱۶	۴	معلول
	انگیزه	C_{12}	۳/۳۸۴	۱/۷۳۱	۵/۱۱۵	۱/۶۵۳	۲	علت
	جلسات ایمنی	C_{13}	۱/۴۹۹	۳/۲۳۵	۴/۷۳۴	-۱/۷۳۷	۵	معلول
	کمیته ایمنی	C_{14}	۳/۲۳۷	۲/۰۵۹	۵/۲۹۵	۱/۱۷۸	۱	علت
	مشارکت مداوم	C_{15}	۲/۳۸۶	۲/۶۶۴	۵/۰۵۰	-۰/۲۷۸	۳	معلول
سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی (C_2)	طرح اجرایی	C_{21}	۲/۷۹۳	۳/۹۱۳	۶/۷۰۶	-۱/۱۲۰		معلول
	آموزش	C_{22}	۳/۵۶۹	۲/۹۱۶	۶/۴۸۵	۰/۶۵۴	۲	علت
	تجهیزات و نگهداری	C_{23}	۲/۵۵۴	۳/۲۲۹	۵/۷۸۳	-۰/۶۷۵	۴	معلول
	ارزیابی برنامه	C_{24}	۳/۵۸۱	۳/۲۴۰	۶/۸۲۱	۰/۳۴۱	۱	علت
	برنامه‌ریزی پیش از کار برای ایمنی	C_{25}	۳/۵۴۹	۲/۷۴۹	۶/۲۹۸	۰/۸۰۰	۳	علت
مدیریت ایمنی (C_3)	ارتباطات	C_{31}	۱/۲۹۱	۰/۷۶۸	۲/۰۵۹	۰/۵۲۳	۴	علت
	تخصیص اختیارات و مسئولیت‌ها	C_{32}	۱/۷۲۹	۰/۴۹۴	۲/۲۲۳	۱/۲۳۵	۳	علت
	تخصیص منابع مناسب	C_{33}	۰/۷۶۰	۱/۸۷۱	۲/۶۳۱	-۱/۱۱۰	۱	معلول
	شناسایی خطرات	C_{34}	۰/۸۹۴	۱/۵۴۱	۲/۴۳۶	-۰/۶۴۷	۲	معلول
تعهد ایمنی (C_4)	حمایت مدیریت	C_{41}	۲/۲۱۷	۱/۹۲۳	۴/۱۴۰	۰/۲۹۳	۱	علت
	کار تیمی	C_{42}	۲/۲۹۲	۱/۷۴۰	۴/۰۳۲	۰/۵۵۱	۲	علت
	اهداف واضح و واقعی	C_{43}	۱/۱۳۴	۲/۶۵۸	۳/۷۹۲	-۱/۵۲۴	۳	معلول
	سیاست‌های ایمنی	C_{44}	۱/۹۳۲	۱/۲۵۳	۳/۱۸۵	۰/۶۷۹	۴	علت

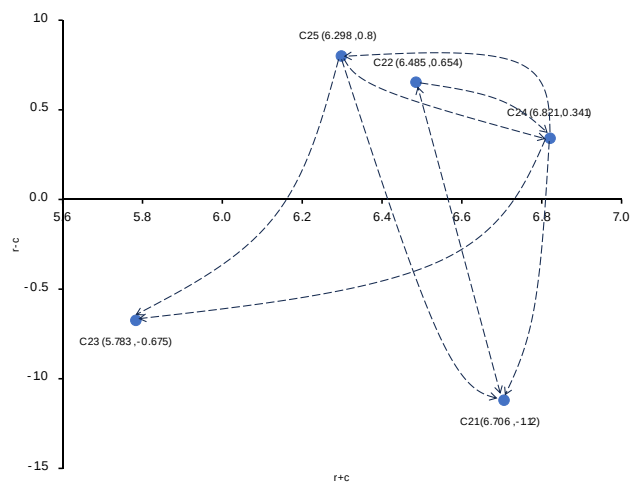
برجسته می‌کند. نمودارهای تأثیر-رابطه زیرعوامل مربوط به هر بعد نیز که بیانگر روابط معنادار بین آن‌هاست در اشکال ۲ الی ۵ ارائه شده‌اند. علاوه بر تعیین عوامل تأثیرگذار و تأثیرپذیر، تحلیل مقادیر $(r+c)$ نشان داد که برخی از مؤلفه‌ها اهمیت بیش‌تری در هر بعد دارند. در بعد مشارکت کارکنان، کمیته ایمنی بالاترین میزان اهمیت را به خود اختصاص داد، در حالی که انگیزه، مشارکت مداوم، نگرش شخصی و جلسات ایمنی، در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در بعد سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، ارزیابی برنامه به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناخته شد و پس از آن، طرح اجرایی، آموزش، برنامه‌ریزی پیش از کار برای ایمنی و تجهیزات و نگهداری قرار گرفتند. در بعد مدیریت ایمنی، تخصیص منابع مناسب بیش‌ترین اهمیت را داشت و در ادامه، شناسایی خطرات، تخصیص اختیارات و مسئولیت‌ها و ارتباطات در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در نهایت، در بعد تعهد ایمنی، حمایت مدیریت بالاترین میزان اهمیت را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده نقش کلیدی مدیریت در ایجاد فرهنگ ایمنی سازمانی است. سایر زیرشاخص‌ها، از قبیل کار تیمی، اهداف واضح و واقعی و سیاست‌های ایمنی، به ترتیب در رتبه‌های بعدی در این بعد قرار گرفته‌اند. نتایج بیانگر آن است که در هر یک از ابعاد، برخی شاخص‌ها نقش کلیدی‌تری در بهبود ایمنی سازمانی ایفا می‌کنند. شناسایی این عوامل می‌تواند به مدیران کمک کند تا با تمرکز بر عوامل علی، تأثیرگذاری بیش‌تری در بهبود سیستم‌های ایمنی داشته باشند. همچنین، شاخص‌هایی که دارای بالاترین مقدار $(r+c)$ هستند، نیازمند توجه ویژه در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌های اجرایی ایمنی سازمان‌ها می‌باشند.

نتایج به‌دست‌آمده از تکنیک دیمتل به‌طور کلی نشان‌دهنده روابط پیچیده و اثرات متقابل میان عوامل مختلف در زمینه عوامل کلیدی موفقیت در استقرار برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در هر یک از ابعاد مورد مطالعه، برخی مؤلفه‌ها به‌عنوان عوامل علی (تأثیرگذار) و برخی دیگر به‌عنوان عوامل معلول (تأثیرپذیر) شناسایی شده‌اند. در بعد مشارکت کارکنان، مؤلفه‌های انگیزه و کمیته ایمنی به‌عنوان عوامل تأثیرگذار تعیین شدند، در حالی که نگرش شخصی، جلسات ایمنی و مشارکت مداوم به‌عنوان عوامل تأثیرپذیر شناخته شدند. در بعد سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، سه شاخص آموزش، ارزیابی برنامه و برنامه‌ریزی پیش از کار برای ایمنی در گروه عوامل علی قرار گرفتند، در حالی که طرح اجرایی و تجهیزات و نگهداری به‌عنوان عوامل معلول شناسایی شدند. این نتایج نشان‌دهنده نقش کلیدی آموزش و ارزیابی برنامه‌ها در بهبود سیستم ایمنی است.

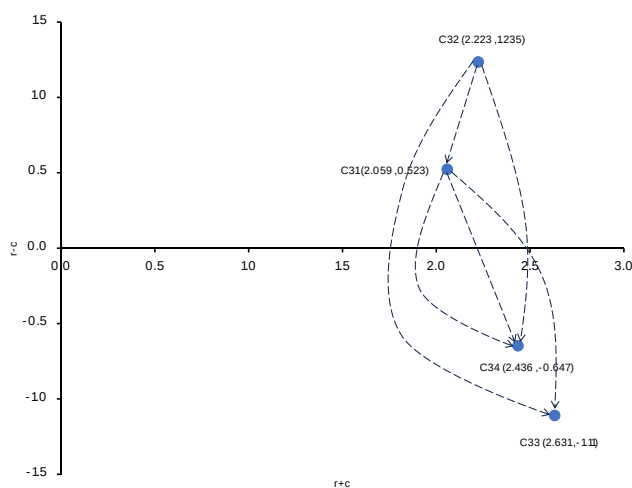
در بعد مدیریت ایمنی، یافته‌ها نشان می‌دهند که ارتباطات و تخصیص اختیارات و مسئولیت‌ها به‌عنوان عوامل تأثیرگذار و تخصیص منابع مناسب و شناسایی خطرات به‌عنوان عوامل تأثیرپذیر شناخته شده‌اند. این امر حاکی از آن است که تقویت ارتباطات و افزایش شفافیت در تخصیص وظایف می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود ایمنی داشته باشد. در نهایت، در بعد تعهد ایمنی، سه شاخص حمایت مدیریت، کار تیمی و سیاست‌های ایمنی به‌عنوان عوامل علی و تنها شاخص اهداف واضح و واقعی به‌عنوان عامل معلول شناسایی شد. این موضوع اهمیت نقش مدیریت و همکاری تیمی را در بهبود تعهد سازمان به ایمنی



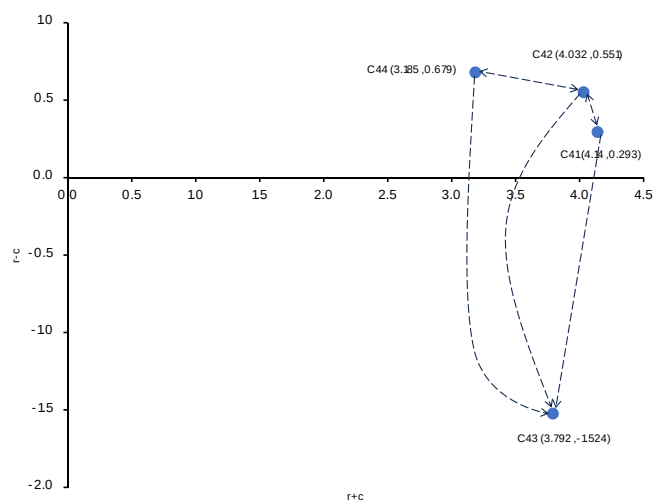
شکل ۲- نمودار تأثیر-رابطه مؤلفه‌های بعد مشارکت کارکنان



شکل ۳- نمودار تأثیر-رابطه مؤلفه‌های بعد سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی



شکل ۴- نمودار تأثیر-رابطه مؤلفه‌های بعد مدیریت ایمنی



شکل ۵- نمودار تأثیر-رابطه مؤلفه‌های بعد تعهد ایمنی

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برنامه‌های ایمنی در بسیاری از کشورها با هدف کاهش صدمات و تلفات در محیط کار، کاهش هزینه‌های ناشی از حوادث و ارتقای اعتبار در صنعت نفت و گاز اجرا شده‌اند. با این حال، عملکرد ایمنی در کشورهای در حال توسعه، به‌ویژه ایران، همچنان با چالش‌هایی همراه است، علی‌رغم اینکه صنعت نفت و گاز نقش به‌سزایی در رشد اقتصادی این کشور دارد. اجرای یک برنامه ایمنی جامع به‌عنوان گامی اساسی برای مقابله با این چالش در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، عوامل کلیدی موفقیت در اجرای برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های صنعت نفت و گاز، به‌ویژه در شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس، به کمک تکنیک دیمتل، روابط علی و معلولی میان این عوامل مشخص گردید تا میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هر یک از آن‌ها تعیین شود. نتایج حاصل از تحلیل روابط علی و معلولی میان ابعاد و مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز در شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران با استفاده از تکنیک دیمتل نشان داد که ابعاد مشارکت کارکنان و مدیریت ایمنی به‌عنوان عوامل علی، نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار ایمنی دارند. از منظر تئوریک، این دو بعد به‌عنوان محرک‌های تغییر در سیستم ایمنی عمل می‌کنند. بنابراین، هرگونه بهبود در این ابعاد می‌تواند سایر مؤلفه‌های ایمنی را نیز تحت تأثیر مثبت قرار دهد. در مقابل، ابعاد سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی و تعهد ایمنی به‌عنوان ابعاد معلول شناخته شدند که نشان‌دهنده تأثیرپذیری این ابعاد از سایر حوزه‌های سازمانی است. این نکته از منظر مدیریتی حائز اهمیت است. چرا که تنها با افزایش سطح تعهد یا توسعه سیستم‌های کنترلی نمی‌توان به ایمنی پایدار دست یافت، مگر آنکه اقدامات زیربنایی در حوزه مشارکت و مدیریت ایمنی به‌طور هم‌زمان بهبود یابند. در سطح زیرشاخص‌ها، مؤلفه‌هایی چون انگیزه و کمیته ایمنی در بعد مشارکت کارکنان، به‌عنوان عوامل علی، بیانگر آن هستند که افزایش انگیزش کارکنان و ایجاد ساختارهای رسمی برای مشارکت در تصمیم‌گیری‌های ایمنی می‌تواند بهبود معناداری در سایر مؤلفه‌ها ایجاد کند. همچنین، آموزش و ارزیابی برنامه در بعد سیستم پیشگیری، با نقش علی خود، بر این نکته دلالت دارند که آموزش مداوم و پایش عملکرد ایمنی، دو راهکار بنیادین برای ارتقاء رفتارها و نتایج ایمنی هستند. در بعد مدیریت ایمنی نیز، زیرشاخص‌هایی هم‌چون ارتباطات و تخصیص اختیارات نقش کلیدی ایفا می‌کنند. این امر نشان می‌دهد که طراحی ساختارهایی برای ارتباط مؤثر بین مدیران و کارکنان، و واگذاری اختیارات ایمنی به سطوح پایین‌تر سازمانی، باعث افزایش انعطاف‌پذیری و

واکنش‌پذیری سازمان در برابر خطرات می‌شود. در عین حال، برخی زیرشاخص‌ها مانند نگرش شخصی، جلسات ایمنی، تجهیزات و نگهداری و اهداف واضح و واقعی به‌عنوان عوامل معلول شناخته شدند. این یافته نشان می‌دهد که این مؤلفه‌ها بیش از آنکه نقش محرک ایفا کنند، نتیجه‌ای از عملکرد و سیاست‌های سایر عوامل هستند. بنابراین، بهبود آن‌ها نیازمند پیش‌نیازهایی در سطح عوامل علی است. نکته حائز اهمیت دیگر این است که تعهد ایمنی، علی‌رغم آنکه به‌عنوان بعدی معلول شناخته شده، بالاترین میزان اهمیت کلی را داراست. این امر نشان‌دهنده جایگاه راهبردی تعهد ایمنی است. به عبارتی، هرچند تعهد ایمنی بیشتر متأثر از دیگر ابعاد است، اما نقش محوری آن در موفقیت نهایی برنامه‌های ایمنی، آن را به یک عامل حیاتی تبدیل کرده است. این مسئله تأیید می‌کند که تعهد مدیریت ارشد به ایمنی، به‌مثابه پیشران انگیزه و سرمایه‌گذاری در سایر ابعاد ایمنی، نقش بی‌بدیلی دارد. در نهایت، تحلیل کلی نشان می‌دهد که برای ارتقاء اثربخش ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز، سازمان‌ها باید در وهله نخست بر افزایش مشارکت کارکنان، تقویت فرآیندهای ارتباطی و مدیریتی، و ایجاد ساختارهای انگیزشی و حمایتی تمرکز کنند. همچنین، آموزش مستمر و ارزیابی‌های منظم نیز باید به‌عنوان ابزارهای پشتیبان در نظر گرفته شوند. تنها در چنین چارچوبی است که می‌توان انتظار داشت شاخص‌های معلولی مانند نگرش شخصی یا اهداف واقعی، بهبود یافته و ایمنی به‌صورت پایدار در پروژه‌ها نهادینه شود. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین به‌ویژه باوفا و همکاران (۲۰۱۸) و بونیا و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که در تمامی آن‌ها تعهد ایمنی به‌عنوان عامل اصلی مؤثر بر موفقیت اجرای برنامه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز شناخته شده است. تحقیق باوفا و همکاران (۲۰۱۸) به شناسایی ۱۱ عامل کلیدی برای اجرای مؤثر برنامه‌های ایمنی پرداخته و بر عواملی مانند تعهد ایمنی، انتخاب پیمانکاران، ناظر و متخصصان ایمنی، طرح ایمنی، مشارکت کارکنان و ارزیابی ایمنی تأکید دارد. این نتایج با یافته‌های تحقیق حاضر که تعهد ایمنی را به‌عنوان عامل اصلی موفقیت در نظر گرفته و بر کمیته ایمنی، ارزیابی برنامه، تخصیص منابع مناسب و حمایت مدیریت تأکید می‌کند، شباهت زیادی دارد. از سوی دیگر، تحقیق بونیا و همکاران (۲۰۲۱) چهار ساختار کلیدی ایمنی شامل مشارکت کارکنان، سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، مدیریت ایمنی و تعهد مدیریت را شناسایی کرده است و نشان می‌دهد که اجرای موفقیت‌آمیز برنامه‌های ایمنی تأثیر مثبتی بر موفقیت کلی پروژه‌ها دارد. این نتایج با تحقیق حاضر که بر سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی و

مشارکت کارکنان تأکید کرده، مشابه است، اما تحقیق حاضر بیشتر بر جزئیات سطح زیرشاخص‌ها مانند کمیته ایمنی و حمایت مدیریت تمرکز دارد. در نتیجه، اگرچه نتایج هر سه تحقیق در برخی از عوامل مشترک هستند، تفاوت‌هایی در رویکردها و تمرکز بر جزئیات اجرایی در زمینه‌های مختلف وجود دارد که ناشی از تفاوت‌های زمینه‌ای و ویژگی‌های خاص پروژه‌های ساخت‌وساز در کشورها و شرکت‌های مختلف است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد‌های کاربردی و مدیریتی برای بهبود عملکرد ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی ایران به شرح زیر است:

براساس نتایج عامل تعهد ایمنی در بین ابعاد اصلی بیش‌ترین تأثیر کل را کسب نمود. مدیران ارشد باید با افزایش توجه به فرهنگ ایمنی و حمایت مستمر از برنامه‌های ایمنی، نشان دهند که ایمنی اولویت اصلی است. این کار می‌تواند با تخصیص منابع مناسب، تقویت مسئولیت‌پذیری در سطوح مختلف و برگزاری دوره‌های

آموزشی مرتبط با ایمنی انجام شود. در بین زیر شاخص‌های بعد مشارکت کارکنان و سیستم پیشگیری و کنترل ایمنی، به ترتیب عوامل کمیته ایمنی و ارزیابی برنامه بیش‌ترین تأثیر کل را کسب نمودند. کمیته ایمنی باید از تخصص‌های مختلف تشکیل شود و تصمیمات آن باید به‌طور مستمر ارزیابی و پیگیری شود. همچنین، ارزیابی دوره‌ای برنامه‌های ایمنی و تطابق آن‌ها با استانداردهای روز می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف و تقویت فرآیندهای ایمنی کمک کند. در بین زیر شاخص‌های بعد مدیریت ایمنی و تعهد ایمنی، به ترتیب عامل‌های تخصیص منابع مناسب و حمایت مدیریت بیش‌ترین تأثیر کل را کسب نمودند. برای اجرای مؤثر برنامه‌های ایمنی، تخصیص منابع مالی، انسانی و زمانی مناسب ضروری است. حمایت مدیریت باید شامل تأمین منابع مالی کافی برای تأسیس زیرساخت‌های ایمنی، آموزش مستمر کارکنان و استفاده از تجهیزات ایمنی پیشرفته باشد.

References

1. Agyekum K, Botchway SY, Adinyira E, Opoku A. Environmental performance indicators for assessing sustainability of projects in the Ghanaian construction industry. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2022;11(4):918–950. DOI: 10.1108/SASBE-11-2020-0161
2. Aka A, Awuzie B, Emuze F, Adewale Shittu A. Evaluating the effectiveness of strategies for implementation of health and safety programs on construction sites in Nigeria: A mixed-method study. *J Safety Res*. 2023;85:172–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.02.001>
3. Al-Otaibi A, Kineber AF. Identifying and Assessing Health and Safety Program Implementation Barriers in the Construction Industry: A Case of Saudi Arabia. *Applied Sciences*. 2023;13(4):2630. DOI: 10.3390/app13042630
4. Alruqi WM, Hallowell MR. Critical success factors for construction safety: Review and meta-analysis of safety leading indicators. *J Constr Eng Manag*. 2019;145(3):04019005. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001626](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001626)
5. Bavafa A, Mahdiyar A, Marsono AK. Identifying and assessing the critical factors for effective implementation of safety programs in construction projects. *Saf Sci*. 2018;106:47–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.02.025>
6. Buniya MK, Othman I, Sunindijo RY, Karakhan AA, Kineber AF, Durdyev S. Contributions of safety critical success factors and safety program elements to overall project success. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2023;29(1):129–140. DOI: 10.1080/10803548.2022.2038419
7. Buniya MK, Othman I, Sunindijo RY, Kashwani G, Durdyev S, Ismail S, et al. Critical Success Factors of Safety Program Implementation in Construction Projects in Iraq. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(16): 8469. DOI: 10.3390/ijerph18168469
8. Buniya MK, Othman I, Sunindijo RY, Kineber AF, Mussi E, Ahmad H. Barriers to safety program implementation in the construction industry. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;12(1):65–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.002>
9. Chai Q, Li H, Tian W, Zhang Y. Critical Success Factors for Safety Program Implementation of Regeneration of Abandoned Industrial Building Projects in China: A Fuzzy DEMATEL Approach. *Sustainability*. 2022;14(3): 1550. DOI: 10.3390/su14031550
10. Hakim IM, Singgih ML, Gunarta IK. Critical Success Factors for Internet of Things (IoT) Implementation in Automotive Companies, Indonesia. *Sustainability*. 2023;15(4): 2909. DOI: 10.3390/su15042909
11. Hallowell MR, Calhoun ME. Interrelationships among highly effective construction injury prevention strategies. *J Constr Eng Manag*. 2011;137(11):985–993. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000354](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000354)
12. Hallowell MR, Gambatese JA. Construction safety risk mitigation. *J Constr Eng Manag*. American Society of Civil Engineers; 2009;135(12):1316–1123. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000107](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000107)
13. Hinze J. Safety plus: Making zero accidents a reality. Construction Industry Institute. 2002;160:11 .
14. Kum YT, Yap JBH, Lew Y-L, Lee WP. Transforming construction health and safety management during COVID-19 pandemic using innovative technologies: PLS-SEM approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*. Emerald Publishing Limited; 2024;31(7):2770–808. DOI: 10.1108/ECAM-08-2022-0780
15. Li Y, Ning Y, Chen WT. Critical Success Factors for Safety Management of High-Rise Building Construction Projects in China. *Advances in Civil Engineering*.

- 2018;2018(1):1516354. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1516354>
16. Mohammadi A, Tavakolan M, Khosravi Y. Factors influencing safety performance on construction projects: A review. *Saf Sci*. 2018;109:382–397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.017>
 17. Ofori EK, Aram SA, Saalidong BM, Gyimah J, Niyonzima P, Mintah C, et al. Exploring new antecedent metrics for safety performance in Ghana's oil and gas industry using partial least squares structural equation modelling (PLS-SEM). *Resources Policy*. 2023;81:103368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103368>
 18. Pinto A, Nunes IL, Ribeiro RA. Occupational risk assessment in construction industry – Overview and reflection. *Saf Sci*. 2011;49(5):616–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.01.003>
 19. Redutskiy Y, Camitz-Leidland CM, Vysochyna A, Anderson KT, Balycheva M. Safety systems for the oil and gas industrial facilities: Design, maintenance policy choice, and crew scheduling. *Reliab Eng Syst Saf*. 2021;210:107545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107545>
 20. Si S-L, You X-Y, Liu H-C, Zhang P. DEMATEL Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications. *Math Probl Eng*. 2018;2018(1):3696457. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3696457>
 21. Tang DKH, Leiliabadi F, Olugu EU, Md Dawal SZ binti. Factors affecting safety of processes in the Malaysian oil and gas industry. *Saf Sci*. 2017;92:44–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.09.017>
 22. Waqar A, Othman I, Shafiq N, Mansoor MS. Evaluating the critical safety factors causing accidents in downstream oil and gas construction projects in Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024;15(1):102300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102300>



Analyzing critical success factors for the implementation of safety programs in construction projects using DEMATEL (A Case Study of the Oil and Gas Industry)

Sholeh Escot

Department of Health, Safety, and Environmental, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Mahnaz Zarei*

Department of Industrial Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 03 May 2025

Accepted: 16 June 2025

Keywords: Safety Programs, Critical Success Factors (CSFs), Construction Projects, DEMATEL.

Extended Abstract

Introduction: Safety is one of the fundamental and vital components in construction projects, especially in high-risk and sensitive industries such as oil and gas, where the occurrence of accidents can have irreparable consequences on human, financial, and environmental resources. The effective implementation of safety programs not only prevents incidents but also improves quality, increases productivity, and reduces project costs. In line with this, the primary objective of the present study is to identify and evaluate the critical success factors (CSFs) in implementing safety programs in construction projects within the oil and gas industry. To achieve this, the Iranian Offshore Engineering and Construction Company was selected as a case study in order to deeply investigate the operational conditions and challenges and to propose scientific and practical solutions for improving safety performance.

Materials and Methods: This study is applied in nature and follows a survey-based data collection approach. The research was conducted between July and September 2024. For data collection, a combination of two tools was used: semi-structured interviews and a structured questionnaire. Initially, a systematic literature review was carried out to identify preliminary factors related to safety in construction projects. These factors were then incorporated into a questionnaire and presented to industry experts. Experts were selected through a snowball sampling method—beginning with several professionals with direct experience in the safety domain, who then referred additional experts to participate in the study. The identified factors were subsequently analyzed using the DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory) technique to explore the causal relationships among them. The calculations related to data analysis were also performed using Excel software.

Results and Discussion: The results of the DEMATEL analysis indicated that among the main identified dimensions, employee participation and safety management were recognized as causal factors, meaning they play a decisive role in influencing other dimensions. In contrast, safety prevention and control systems and safety commitment were identified as effect factors, meaning they are most influenced by the other dimensions. Notably, the findings revealed that safety commitment, with an importance coefficient of 4.177, played a central and crucial role in the success of safety programs and was emphasized as the most important component among other factors. Following that, the safety prevention and control system, safety management, and employee participation ranked next with importance coefficients of 4.154, 3.936, and 3.061, respectively.

Conclusion: This study provides both practical and theoretical insights, emphasizing the importance of organizational commitment to safety and fostering a participative culture among employees. The findings can assist managers, decision-makers, and policymakers in the field of safety in oil and gas construction projects by identifying key intervention points to enhance safety performance, reduce risks, and increase the sustainability of construction activities.

Corresponding author: Mahnaz Zarei

Address: Department of Industrial Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Tel: +989177161298

Email: mahnaz.zarei@iaau.ac.ir

Citation: Escot Sh, Zarei M. Analyzing critical success factors for the implementation of safety programs in construction projects using DEMATEL (A Case Study of the Oil and Gas Industry). Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 3(9): 1-17.

© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.





بررسی میزان آگاهی و سواد محیط زیستی دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی با رویکرد

توسعه پایدار و صیانت از محیط زیست

استادیار گروه محیط زیست، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران

امید طبیعی*

چکیده مبسوط

مقدمه: یکی از مهم ترین مولفه های کلیدی و اساسی تاثیرگذار بر سلامت و تضمین کیفیت زندگی نسل های کنونی و آینده بشر، محیط زیست سالم و پایدار و صیانت از آن است. توسعه پایدار که به معنای تأمین نیازهای امروز بدون به خطر انداختن توان نسل های آینده است، ارتباط مستقیم با میزان آگاهی، نگرش مثبت، مشارکت فعال و رفتارهای افراد در زمینه محیط زیست دارد. لذا، برای کاهش بحران های محیط زیست و صیانت از آن، مطالعه حاضر با هدف تعیین سطح آگاهی و سواد محیط زیستی دانشجویان ورودی کاردانی و کارشناسی در مورد شناخت و اهمیت صیانت از محیط زیست انجام پذیرفت.

مواد و روش ها: پژوهش حاضر، مطالعه ای مقطعی از نوع توصیفی تحلیلی است. نمونه ها شامل تعداد ۳۸۴ نفر از دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی دانشگاه آزاد اسلامی استان فارس بودند که به صورت نمونه گیری به روش در دسترس انتخاب شدند. از دانشجویان خواسته شد تا پرسشنامه ها را که شامل سؤالاتی در زمینه مشخصات جمعیت شناسی، آگاهی و دانش عمومی در مورد محیط زیست و صیانت از آن بود تکمیل کنند. اعتبار پرسشنامه قبل از انجام مطالعه تعیین شد (۰/۸۱). با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ و با بهره گیری از آمار توصیفی و آزمون های کای دو (χ^2)، من ویتنی و کروسکال والیس تجزیه و تحلیل داده ها انجام پذیرفت.

نتایج و بحث: یافته های این پژوهش نشان داد که ۸۹/۳۲ درصد از دانشجویان، از میزان آگاهی ضعیفی در مورد شناخت واژه سواد محیط زیست و اهمیت آن برخوردار بودند و ۹۰/۶۲ درصد از دانشجویان تمایل به افزایش دانش و آگاهی در مورد محیط زیست و نقش آن در سلامت دارند. نتایج نشان داد بین جنسیت و آگاهی، تحصیلات و آگاهی و همچنین گروه سنی و آگاهی، ارتباط معنی داری از نظر آماری وجود دارد ($P < 0.05$).

نتیجه گیری: یافته های پژوهش نشان داد که دانشجویان مشارکت کننده در این مطالعه، از دانش پایینی در رابطه با سواد محیط زیست و اهمیت صیانت از آن و توسعه پایدار برخوردار می باشند و بر همین اساس نیازمند برنامه های آموزشی منظم، گسترده و سیستماتیک در زمینه افزایش سواد و فرهنگ محیط زیست و توسعه پایدار هستند. لذا لازم است احاد ملت با مفهوم سواد اکولوژیکی یا سواد محیط زیست آشنا تا تصمیم های آگاهانه در صیانت از محیط زیست اتخاذ نمایند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

واژه های کلیدی: آگاهی، سواد اکولوژی، سواد محیط زیست، صیانت، توسعه پایدار.

نویسنده مسئول: امید طبیعی

نشانی: استادیار گروه محیط زیست، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران

تلفن: ۰۹۱۷۳۱۷۲۷۱۰

پست الکترونیکی: omid.Tabiee@iau.ac.ir

استاد: طبیعی امید. بررسی میزان آگاهی و سواد محیط زیستی دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی با رویکرد توسعه پایدار و صیانت از محیط زیست. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۴؛ ۹(۳): ۲۸-۱۸.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

محیط‌زیست جهانی در نتیجه تغییرات جدی ناشی از اقدامات انسانی و بروز بحران‌های محیط‌زیستی نظیر گرمایش جهانی، تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش تنوع زیستی که از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر به شمار می‌روند، نیازمند اقداماتی فوری و آگاهانه در راستای توسعه پایدار و صیانت از محیط‌زیست می‌باشد. در حال حاضر کیفیت محیط‌زیست به‌طور قابل توجه و با سرعت نگران کننده‌ای از طریق کاهش کیفیت هوا، آب، خاک، افزایش آلودگی اقیانوس‌ها، انقراض حیات وحش، از بین رفتن تنوع زیستی و افزایش فراوانی و شدت بلایای طبیعی فاجعه‌بار که منجر به از دست رفتن جان و مال انسان، شیوع و افزایش بیماری‌های سرطانی و موارد مشابه می‌شوند، تغییر کرده است (عباس ۲۰۱۳، عباس و سینگ ۲۰۱۴). پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که آموزش و ارتقاء سواد محیط‌زیست و افزایش آگاهی مردم نسبت به مسائل و بحران‌های محیط‌زیست به‌عنوان یک اقدام ضروری در دهه‌های اخیر، نقش کلیدی در ارتقاء نگرش‌ها و رفتارهای مسئولانه نسبت به محیط‌زیست و دستیابی به توسعه پایدار ایفا می‌کند (عباس و سینگ ۲۰۱۴، ریکمن ۲۰۱۷، میرفردی و سلامتیان ۲۰۲۵، احمدی و رئیس ۲۰۲۵). آموزش محیط‌زیست مجموعه‌ای از فرآیندها و فعالیت‌هایی است که از طریق آن‌ها درک محیط‌زیست توسعه می‌یابد. بنابراین آموزش محیط‌زیست راهی برای ایجاد دانش، درک، ارزش‌ها، نگرش‌ها، مهارت‌ها، توانایی‌ها و آگاهی در میان افراد و گروه‌های اجتماعی نسبت به محیط‌زیست و صیانت از آن است و از طریق آن‌ها پاسخ‌های دلسوزانه و متعهدانه تکامل می‌یابد. در نتیجه سواد محیط‌زیستی، به‌عنوان ترکیبی از دانش، نگرش، و مهارت‌های لازم برای درک تعاملات انسان و محیط، نقشی محوری در ترویج رفتارهای مسئولانه در قبال محیط‌زیست بازی می‌نماید (مایگاری ۲۰۰۲، هول‌وگ و همکاران ۲۰۱۱، ابراهیم و اسماوی ۲۰۱۲، کانی‌گیلا و همکاران ۲۰۲۱). بر همین اساس مردم باید از اهمیت محیطی که در آن زندگی می‌کنند و لزوم حفظ و حراست از آن، و همچنین پیامدهای اقدامات خود در جریان فعالیت‌های توسعه‌ای آگاه شوند. هدف نهایی آموزش محیط‌زیست، هدایت و شکل‌دهی رفتار انسان به سمت اعمال و تعهدات مسئولانه نسبت به محیط‌زیست است. سواد محیط‌زیست به معنای توانایی شناخت، تحلیل و اقدام آگاهانه درباره موضوعات محیط‌زیست است که می‌تواند به پایداری اجتماعی و محیط‌زیست منجر شود (مک‌بث و ولک ۲۰۰۹). به همین دلیل، آموزش مؤثر محیط‌زیست، رفتار شهروندی مسئولانه نسبت به محیط‌زیست و صیانت از آن را تقویت و ترویج می‌کند. بنابراین، آموزش و آگاهی محیط‌زیستی و همچنین مشارکت عمومی در صیانت از محیط‌زیست برای

دستیابی به پایداری محیط‌زیست بسیار مهم است. با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص ایران که بر روی کمربند خشک جهان واقع گردیده است و از سویی دیگر با در نظر گرفتن وضعیت آلودگی و بحران‌های محیط‌زیست در کشور به‌ویژه در دهه‌های اخیر، استفاده از راهکارها و ابزارهای مدیریتی از جمله توجه به مفاهیم سواد اکولوژیکی و یا سواد محیط‌زیستی از اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری کلان مدیریت و صیانت از محیط‌زیست و دستیابی به توسعه پایدار برخوردار است. لذا مطالعه و بررسی سواد محیط‌زیست به‌عنوان یک راهکار جهت مقابله با بحران محیط‌زیست در کشور و دستیابی به توسعه پایدار و صیانت از محیط‌زیست کشور از ضرورت‌های غیرقابل انکار در شرایط کنونی و از جمله برنامه‌های چشم‌انداز آینده برای این مرز و بوم پُر گهر در دهه‌های پیش‌رو خواهد بود. در ارتباط با سنجش آگاهی و ارزیابی نگرش افراد در ارتباط با شناخت و آگاهی از محیط‌زیست و توسعه پایدار و اهمیت آن در مدیریت منابع طبیعی و محیط‌زیست تاکنون مطالعه مشابهی در داخل و خارج کشور انجام پذیرفته است، که می‌توان به پژوهش‌های کایسر و فوهرر (۲۰۰۳)، میهن‌پور و همکاران (۲۰۱۷)، ویسی و همکاران (۲۰۱۹)، صالحی و ابراهیمی (۲۰۲۰)، میرفردی و سلامتیان (۲۰۲۲)، ساسا و همکاران (۲۰۲۲)، یلدیز و اوزدمیر (۲۰۲۳)، کائو و جیان (۲۰۲۴)، مکومباچی و همکاران (۲۰۲۴)، تجری و همکاران (۲۰۲۵) و احمدی و رئیس (۲۰۲۵) اشاره نمود. با در نظر گرفتن نقش و جایگاه ویژه دانشجویان، به‌عنوان نیروی پیشران توسعه و نوآوری در جهت‌گیری‌های مدیریت محیط‌زیست و منابع طبیعی، یکی از موضوعات مهم و کلیدی در مدیریت و صیانت از محیط‌زیست بررسی و ارزیابی سطح دانش، باورها، نگرش و عملکرد دانشجویان در زمینه شناخت و بکارگیری اصول و مفاهیم سواد محیط‌زیست و توسعه پایدار است. با این حال، بررسی سطح سواد و آگاهی محیط‌زیستی این گروه، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، هم‌چنان نیازمند توجه بیشتری است. هدف از انجام این پژوهش، تعیین سطح دانش عمومی دانشجویان به نمایندگی از آحاد مردم در رابطه با سواد محیط‌زیستی و توسعه پایدار است. بنابراین، این مطالعه تلاش کرد تا یک مطالعه خرد در مورد آگاهی، نگرش و مشارکت محیط‌زیستی در بین دانشجویان کاردانی و کارشناسی دانشگاه انجام دهد. دانشجویان ورودی به مقطع کاردانی و کارشناسی رشته‌های مختلف دانشگاه با توجه به این موضوع که در مقطع قبل آشنایی نسبی با مفاهیم محیط‌زیست و انسان داشته‌اند راه خوبی را برای مطالعه و بررسی آگاهی و مشارکت محیط‌زیستی دانشجویان فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر تحقیق مقطعی از نوع، پژوهش‌های توصیفی تحلیلی است که با هدف تعیین میزان دانش و آگاهی دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی در رابطه با سواد محیط‌زیست و اهمیت حفاظت از محیط‌زیست و دستیابی به توسعه پایدار به صورت میدانی انجام گردید. جامعه آماری پژوهش در این مطالعه با در نظر گرفتن جمعیت دانشجویی دانشگاه آزاد اسلامی استان فارس و با استفاده از فرمول کوکران، ۳۸۴ نفر از دانشجویان دختر و پسر ورودی به مقاطع کاردانی و کارشناسی رشته‌های مختلف تحصیلی بودند که به روش در دسترس وارد مطالعه شدند. در این پژوهش پیمایشی، با استفاده از پرسش‌نامه محقق ساخته به عنوان ابزار جمع‌آوری اطلاعات، داده‌ها در سه بخش، شامل سؤالات جمعیت‌شناسی، دانش و آگاهی در زمینه محیط‌زیست و توسعه پایدار و تمایل دانشجویان در مورد حفاظت از محیط‌زیست جمع‌آوری گردید. پرسش‌های مربوط به پرسشنامه از نظر روایی و پایایی با یک حجم نمونه ۳۰ تایی در جنبه‌های مختلف ارزیابی

شدند. سنجش پایایی پرسشنامه، از طریق ضریب آلفای کرونباخ و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ مورد سنجش قرار گرفت که مقدار برآورد شده در این تحقیق ۰/۸۱ به دست آمد. جهت تعیین میزان آگاهی افراد مورد مطالعه، تعداد ۸ پرسش لحاظ شده است (جدول ۲) که به هر جواب داده شده یک نمره اختصاص داده شده و پرسش‌ها نمره‌گذاری شدند (بله=۱ و خیر=صفر). در نهایت بر اساس نمره کل محاسبه شده برای هر فرد میزان سطح آگاهی در سه سطح ضعیف، متوسط و خوب طبقه‌بندی شدند. پرسش‌نامه سطح تمایل حفاظت از محیط‌زیست، شامل ۳ پرسش می باشد که بر اساس تمایل افراد در این مورد در نظر گرفته شد (جدول ۴). پس از جمع‌آوری داده‌ها، اطلاعات با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و آزمون‌های آمار توصیفی و آمار استنباطی (آزمون کای دو^۱، آزمون من‌ویتنی^۲ و آزمون کروسکال والیس^۳) تجزیه و تحلیل انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های جمعیت‌شناسی افراد پاسخ‌دهنده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، اکثریت افراد مشارکت‌کننده، در گروه سنی ۱۸ تا ۲۰ سال (۶۲/۷۶ درصد)، بدون تحصیلات دانشگاهی بر

اساس آخرین مدرک رسمی و دارای دیپلم (۸۳/۵۹ درصد)، مجرد (۹۰/۸۸ درصد)، از نظر جنسیت زن (۷۷/۶ درصد)، فاقد شغل تمام وقت (۸۳/۰۷ درصد) و فاقد عضویت در سازمان‌های مردم نهاد (۹۴/۲۷ درصد) بوده‌اند.

جدول ۱- مشخصات جمعیت‌شناسی دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی مشارکت‌کننده در تحقیق

ردیف	ویژگی‌های فردی	توزیع	تعداد	درصد فراوانی
۱	جنسیت	مرد	۸۶	۲۲/۴
		زن	۲۹۸	۷۷/۶
۲	گروه سنی	۱۸-۲۰ سال	۲۴۱	۶۲/۷۶
		۲۱-۲۵ سال	۹۸	۲۵/۵۲
		بزرگتر از ۲۵ سال	۴۵	۱۱/۷۲
۳	وضعیت تأهل	مجرد	۳۴۹	۹۰/۸۸
		متاهل	۳۵	۰۹/۱۲
۴	سطح تحصیلات (آخرین مدرک)	دیپلم	۳۲۱	۸۳/۵۹
		تحصیلات دانشگاهی	۶۳	۱۶/۴۱
۵	وضعیت اشتغال	شاغل تمام‌وقت	۶۵	۱۶/۹۳
		سایر موارد	۳۱۹	۸۳/۰۷
۶	عضویت در سازمان‌های مردم نهاد	دارای عضویت	۲۲	۰۵/۷۳
		فاقد عضویت	۳۶۲	۹۴/۲۷

1- χ^2

2- Mann-Whitney

3- Kruskal-wallis

حفاظت از آن در سه سطح ژن، گونه و اکوسیستم در تأمین امنیت غذایی، امنیت اقتصادی، امنیت اجتماعی - فرهنگی و امنیت سیاسی کشورها بی‌خبر بوده و اظهار بی‌اطلاعی و ناآگاهی نمودند. با استفاده از آزمون من‌ویتنی مشخص شد که اختلاف آماری معنی‌داری بین جنسیت از نظر دانش و سواد محیط‌زیست و عوامل تهدید محیط‌زیست وجود دارد ($P < 0.05$). همچنین آزمون کروسکال والیس نشان داد که اختلاف آماری معنی‌داری بین سطح تحصیلات و گروه‌های سنی از نظر آگاهی و دانش در زمینه شناخت و عوامل تهدید محیط‌زیست وجود دارد ($P < 0.05$).

نتایج حاصل از بررسی میزان سطح آگاهی و دانش سواد محیط‌زیستی افراد مورد مطالعه در این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است. از سویی دیگر توزیع فراوانی افراد بر اساس اختلاف آماری از نظر وضعیت آگاهی در جدول ۳ و شکل ۱ آورده شده است. با توجه به نمره‌گذاری سؤالات و پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها مشخص گردید که بیش‌تر افراد شرکت‌کننده در این پژوهش (۸۹/۳۲ درصد) در ارتباط با واژه سواد اکولوژیکی یا سواد محیط‌زیست و تعریف و اهمیت آن از آگاهی و شناخت پایینی در این خصوص برخوردار بوده‌اند و با این واژه آشنایی نداشتند. از سویی دیگر بر اساس یافته‌های این تحقیق ۷۹/۹۴ درصد از پاسخ‌گویان در این مطالعه از نقش مهم و کلیدی تنوع‌زیستی و

جدول ۲ - میزان سطح دانش و نگرش پاسخ‌گویان در زمینه سواد محیط‌زیست و اهمیت صیانت از آن

متغیرهای سنجش آگاهی		بلی، تعداد (درصد)	خیر، تعداد (درصد)
آیا با واژه سواد اکولوژی یا محیط‌زیست و اهمیت آن آشنایی دارید؟		۴۱ (۱۰/۶۸)	۳۴۳ (۸۹/۳۲)
سطح معنی‌داری جنسیت	سطح معنی‌داری تحصیلات	۰/۰۳۱*	۰/۰۲۱*
آیا با واژه توسعه پایدار آشنایی دارید و از مفاهیم آن آگاهید؟		۱۶۳ (۴۲/۴۵)	۲۲۱ (۵۷/۵۵)
سطح معنی‌داری جنسیت	سطح معنی‌داری تحصیلات	۰/۰۱۰*	۰/۰۱۴*
آیا با واژه منابع طبیعی آشنایی دارید و از مفاهیم و تقسیم‌بندی آن آگاهید؟		۹۶ (۲۵/۰۰)	۲۸۸ (۷۵/۰۰)
سطح معنی‌داری جنسیت	سطح معنی‌داری تحصیلات	۰/۰۱۰*	۰/۰۱۴*
آیا با واژه‌های آلودگی هوا، آب و خاک آشنایی دارید و از مفاهیم و علت آن آگاهید؟		۱۷۹ (۴۶/۶۲)	۲۰۵ (۵۳/۳۸)
سطح معنی‌داری جنسیت	سطح معنی‌داری تحصیلات	۰/۰۰۹*	۰/۰۲۲*
آیا از پیامد آلودگی‌های محیط‌زیست در سلامت و مرگ و میر انسان‌ها آگاهی دارید؟		۱۰۷ (۲۷/۸۷)	۲۷۷ (۷۲/۱۳)
سطح معنی‌داری جنسیت	سطح معنی‌داری تحصیلات	۰/۰۱۰*	۰/۰۱۳*
آیا از اهمیت مشارکت و نقش مردم در مدیریت و صیانت از محیط‌زیست به‌عنوان یک شاخص سلامت اجتماعی آگاهی دارید؟		۱۵۹ (۴۱/۴۱)	۲۲۵ (۵۸/۵۹)
سطح معنی‌داری جنسیت	سطح معنی‌داری تحصیلات	۰/۰۱۰*	۰/۰۱۲*
آیا اطلاع دارید که تنوع‌زیستی و حفاظت از آن نقش مهم و کلیدی در تأمین امنیت غذایی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارد؟		۷۷ (۲۰/۰۶)	۳۰۷ (۷۹/۹۴)
سطح معنی‌داری جنسیت	سطح معنی‌داری تحصیلات	۰/۰۱۱*	۰/۰۱۵*

* معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد احتمال، ** معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد احتمال

جدول ۳ - توزیع فراوانی پاسخ‌گویان از نظر آگاهی و سطح سواد محیط‌زیست بر اساس جنسیت و سطح تحصیلات

نمره آگاهی		جنسیت			
		زن		مرد	
تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد
۱۶۰	۵۳/۶۹	۴۶	۵۳/۴۸	۲۲۶	۵۸/۸۵
۱۰۳	۳۰/۶۹	۱۴	۱۶/۲۷	۱۱۷	۳۰/۴۶
۳۵	۱۵/۶۲	۶	۳۰/۲۵	۴۱	۱۰/۶۹
تحصیلات					
نمره آگاهی		دیپلم		دانشگاهی	
		تعداد	درصد	تعداد	درصد
۱۹۲	۵۹/۸۱	۳۴	۵۳/۹۶	۲۲۶	۵۸/۸۵
۹۴	۲۹/۲۸	۲۳	۳۶/۵۰	۱۱۷	۳۰/۴۶
۳۵	۱۰/۹۱	۶	۹/۵۴	۴۱	۱۰/۶۹



شکل ۱- توزیع فراوانی پاسخ‌گویان از نظر وضعیت آگاهی و سطح سواد محیط‌زیست بر اساس جنسیت و سطح تحصیلات

دیگر با توجه به نتایج این مطالعه ۸۹/۸۴ درصد از مشارکت‌کنندگان تمایل دارند در برنامه‌های صیانت از محیط‌زیست به‌عنوان یک نقش اجتماعی مشارکت نمایند. بر اساس یافته‌های این پژوهش و با استفاده از آمار استنباطی مشخص شد که سطح عملکرد و تمایل افراد در حمایت از محیط‌زیست و صیانت آن از نظر جنسیت و سطح تحصیلات اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر دارند ($P > 0.05$).

نتایج حاصل از بررسی تمایل افراد مشارکت‌کننده در ارتباط با تمایل به مشارکت در توسعه پایدار و صیانت از محیط‌زیست در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس یافته‌های این پژوهش ۹۰/۶۲ درصد از افراد مورد مطالعه تمایل به افزایش دانش و آگاهی درخصوص مسائل محیط‌زیست و اهمیت آن در سلامت را دارند. همچنین یافته‌های این مطالعه نشان داد که ۸۹/۳۲ درصد از افراد پاسخگو تمایل به افزایش سطح آگاهی خود در ارتباط با شناخت محیط‌زیست و نقش آن در توسعه پایدار را دارند. از سویی

جدول ۴ - تمایل پاسخ‌گویان در ارتباط با صیانت از محیط‌زیست و توسعه پایدار

متغیرهای سنجش عملکرد							
بلی				خیر			
تعداد (درصد)				تعداد (درصد)			
۳۴۸ (۹۰/۶۲)				۳۶ (۰۹/۳۸)			
آیا تمایل به افزایش دانش و آگاهی در خصوص مسائل محیط‌زیست و اهمیت آن در سلامت دارید؟							
جنسیت				تحصیلات			
زن		مرد		دیپلم		دانشگاهی	
بلی	خیر	بلی	خیر	بلی	خیر	بلی	خیر
۲۸۴	۱۴	۶۴	۲۲	۲۸۸	۳۳	۶۰	۳
سطح معنی‌داری		۰/۰۱۰ *		سطح معنی‌داری		۰/۰۰۹ *	
آیا تمایل به افزایش دانش و آگاهی در خصوص نقش و اهمیت محیط‌زیست در توسعه پایدار دارید؟							
۳۴۳ (۸۹/۳۲)				۴۱ (۱۰/۶۸)			
جنسیت				تحصیلات			
زن		مرد		دیپلم		دانشگاهی	
بلی	خیر	بلی	خیر	بلی	خیر	بلی	خیر
۲۸۵	۱۳	۵۸	۲۸	۲۸۸	۳۳	۵۵	۰۸
سطح معنی‌داری		۰/۰۴۶ *		سطح معنی‌داری		۰/۰۱۱ *	
آیا تمایل دارید در برنامه‌های صیانت از محیط‌زیست به‌عنوان یک نقش اجتماعی مشارکت نمایید؟							
۳۴۵ (۸۹/۸۴)				۳۹ (۱۰/۱۶)			
جنسیت				تحصیلات			
زن		مرد		دیپلم		دانشگاهی	
بلی	خیر	بلی	خیر	بلی	خیر	بلی	خیر
۲۷۲	۲۶	۷۳	۱۳	۲۸۸	۳۳	۵۷	۰۶
سطح معنی‌داری		۰/۰۳۵ *		سطح معنی‌داری		۰/۰۱۳ *	

* معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد احتمال

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با گسترش روزافزون مسائل و بحران‌های محیط‌زیست در جهان معاصر، اهمیت افزایش میزان آگاهی و سطح سواد محیط‌زیستی به‌عنوان یکی از پایه‌های اساسی توسعه پایدار بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این میان ارزیابی و تعیین سطح آگاهی و سواد محیط‌زیستی دانشجویان با توجه به نقش کلیدی آنان به‌ویژه در مقاطع کاردانی و کارشناسی به‌عنوان نسلی که آینده کشور و محیط‌زیست را رقم خواهند زد، موضوعی است که نیازمند توجه و اهمیت فزاینده‌ای است. سنجش میزان سواد و آگاهی محیط‌زیستی دانشجویان می‌تواند راهنمای مهمی برای دانشگاه‌ها و نهادهای آموزشی در جهت طراحی برنامه‌های آموزشی متناسب و مؤثر باشد (فیلهو ۲۰۱۱). این سنجش کمک می‌کند تا نقاط ضعف موجود شناسایی و برنامه‌ریزی‌هایی جهت افزایش آگاهی، نگرش و رفتارهای محیط‌زیستی پایدار انجام شود (دان‌لپ و جونز ۲۰۰۲). تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که میزان آگاهی

محیط‌زیستی دانشجویان می‌تواند بر رفتارهای محیط‌زیستی آنان تأثیرگذار باشد که این امر منوط به سطح دانش و نگرش‌های محیط‌زیستی دانشجویان است که عدم توجه به آن می‌تواند مانع از تحقق اهداف آموزش محیط‌زیست و دستیابی به توسعه پایدار شود (دان‌لپ و جونز ۲۰۰۲، فیلهو ۲۰۱۱، یلدیز و اوزدمیر ۲۰۲۳). حفاظت از محیط‌زیست یکی از جمله مسائل مهم روز جهان و یک جزء جدایی‌ناپذیر به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار است که به‌عنوان یک ارزش بنیادین مورد نیاز، برای نسل‌های امروز و آیندگان مورد پذیرش همگانی است (جابر و همکاران ۲۰۱۳). در این راستا، آگاهی و سواد محیط‌زیستی، به‌عنوان پیش‌نیازهای اصلی برای ایجاد نگرش مثبت و مشارکت فعال در حفاظت از محیط‌زیست شناخته می‌شوند (مونرو ۲۰۰۳). توسعه پایدار که بر حفظ منابع طبیعی و بهبود کیفیت زندگی نسل‌های حاضر و آینده تأکید دارد، نیازمند دانش و نگرش صحیح نسبت به مسائل

محیط‌زیست است که باید از طریق نظام‌های آموزشی به دانشجویان منتقل شود. در همین راستا شناخت و بررسی میزان آگاهی و سواد محیط‌زیستی دانشجویان می‌تواند زمینه‌ساز برنامه‌ریزی‌های آموزشی و فرهنگی مؤثر در جهت تحقق توسعه پایدار و صیانت از محیط‌زیست باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که محیط دانشگاه به‌عنوان یک بستر آموزشی و فرهنگی، نقش مهمی در شکل‌گیری نگرش‌ها و رفتارهای محیط‌زیستی دانشجویان دارد. پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، نشان می‌دهد که ارتقاء سواد محیط‌زیستی می‌تواند به‌عنوان یک عامل مؤثر در تقویت رفتارهای مسئولانه نسبت به محیط‌زیست و حمایت از توسعه پایدار تلقی شود (میرفردی و سلامتیان ۲۰۲۲، حسنی ۲۰۲۵، تجری و همکاران ۲۰۲۵). با این حال، میزان آگاهی و سواد محیط‌زیستی در میان دانشجویان مقاطع مختلف تحصیلی تفاوت‌هایی دارد که نیازمند بررسی دقیق به‌منظور ریشه‌یابی و تعیین عوامل تأثیرگذار بر رفتار و نگرش دانشجویان است. نتایج این مطالعه نشان داد که به ترتیب ۸۹/۳۲ و ۵۷/۵۵ درصد از افراد مورد مطالعه در ارتباط با شناخت مفهوم واژه سواد اکولوژیکی یا محیط‌زیست و شناخت و مفهوم توسعه پایدار از آگاهی مناسبی برخوردار نبوده و از سطح دانش پایینی در مورد این دو واژه مهم برخوردار هستند. علیرغم این موضوع که درصد قابل توجهی از دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی مشارکت‌کننده در این تحقیق (۸۳/۵۹) درس انسان و محیط‌زیست را در پایه ۱۱ دبیرستان گذرانده بودند با این وجود با واژه سواد اکولوژیکی و تعریف آن ناآشنا هستند. اما با این وجود به ترتیب ۹۰/۶۲ و ۸۹/۳۲ درصد از دانشجویان مشارکت‌کننده در این مطالعه تمایل خود به افزایش دانش و آگاهی درخصوص مسائل محیط‌زیست و اهمیت آن در سلامت و افزایش دانش و آگاهی درخصوص نقش و اهمیت محیط‌زیست در توسعه پایدار را ابراز نموده‌اند. نتایج مطالعات کو و دنیس (۲۰۱۱) و زیگلر و همکاران (۲۰۱۲)، نشان‌دهنده آن است که افزایش دانش و آگاهی محیط‌زیست با اقدامات محیط‌زیست و حفاظت از آن ارتباط دارد. همان‌گونه که یافته‌های این پژوهش نشان داد ۸۹/۸۴ درصد از افراد مورد مطالعه در این تحقیق تمایل دارند با افزایش آگاهی و سواد محیط‌زیستی در برنامه‌های صیانت از محیط‌زیست به‌عنوان یک نقش اجتماعی مشارکت و نقش ایفا نمایند که این نتایج با یافته‌های کو و دنیس (۲۰۱۱) و زیگلر و همکاران (۲۰۱۲)، هم‌خوانی دارد. یافته‌های این پژوهش که بیانگر رفتار و تمایل به مشارکت در برنامه‌های صیانت از محیط‌زیست به‌عنوان یک نقش اجتماعی است (۸۹/۸۴ درصد) با نتایج میرفردی و سلامتیان (۲۰۲۵) که در آن ۹۸ درصد از مشارکت‌کنندگان از رفتار مسئولانه متوسط و بالایی نسبت به محیط‌زیست برخوردار بوده‌اند هم‌خوانی دارد. از سویی دیگر با

وجود بحرانی بودن وضعیت محیط‌زیست و منابع طبیعی در ایران، متأسفانه میزان آگاهی افراد پاسخ‌دهنده از شناخت منابع طبیعی و انواع آن محدود بوده و ۷۵ درصد از افراد مشارکت‌کننده درخصوص منابع طبیعی و انواع آن آگاه نبوده‌اند و شناختی از تعریف درست واژه منابع طبیعی نداشتند که پایین بودن میزان این شناخت و دلایل آن نیازمند مطالعه و بحث‌های بسیار زیادی در ارتباط با دلایل و ریشه‌های آن است. در همین راستا افزایش آگاهی و فرهنگ‌سازی در زمینه منابع طبیعی و سواد اکولوژیکی می‌تواند در تمایل افراد به مشارکت و رعایت اصول دستیابی به توسعه پایدار و صیانت از محیط‌زیست تأثیرگذار باشد. از سویی دیگر بر اساس یافته‌های این تحقیق، مردان در مقایسه با زنان از سطح آگاهی پایین‌تری در مورد مسائل محیط‌زیست و مدیریت منابع آن برخوردار بوده‌اند که با توجه به نقش و اهمیت بانوان هر سرزمین در محیط خانه توجه به این پدیده ضروری و حائز اهمیت است. همچنین نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد اختلاف آماری معنی‌داری بین میانگین میزان آگاهی افراد مورد مطالعه در این تحقیق برحسب جنسیت وجود دارد ($P < 0.05$). بر اساس یافته‌های این پژوهش مشخص گردید که بین میزان آگاهی افراد و عملکرد حمایتی در ارتباط با صیانت از محیط‌زیست با سطح تحصیلات رابطه معنی‌داری وجود دارد ($P < 0.05$). همان‌گونه که از نتایج این پژوهش برآورد می‌گردد باوجود آنکه پرسش‌نامه‌ها به‌صورت در دسترس در بین دانشجویان توزیع و جمع‌آوری شده است، بر اساس یافته‌های این پژوهش ۸۳/۵۹ درصد از پاسخ‌دهندگان مشارکت‌کننده در این پژوهش دارای سطح تحصیلات دیپلم هستند که به‌دلیل این موضوع است که آخرین مدرک تحصیلی ملاک عمل قرار گرفته است و این افراد دانشجویان مقطع کاردانی و کارشناسی هستند، اما با این وجود از سطح آگاهی مناسبی در ارتباط با مفاهیم سواد محیط‌زیستی و خطرات و تهدید محیط‌زیست برخوردار نیستند. لذا این‌گونه استنباط می‌گردد که یکی از دلایل مهم مربوط به پایین بودن سطح آگاهی دانشجویان درخصوص مفاهیم سواد اکولوژیکی و توسعه پایدار، می‌تواند به‌علت عدم وجود آموزش کافی و در اولویت نبودن آموزش محیط‌زیست و افزایش فرهنگ محیط‌زیست در سطح آموزش و پرورش و همچنین آموزش عالی در سطح دانشگاه‌های کشور باشد. در آموزش‌های محیط‌زیست، دانش‌آموزان و دانشجویان از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و بهترین رسانه برای رساندن پیام اهمیت محیط‌زیست و توسعه پایدار هستند، چرا که از یک سو دانش‌آموزان و دانشجویان تأثیرپذیری و آموزش‌پذیری بالایی دارند و از دیگر سو می‌توانند بر روی افراد خانواده و به‌دنبال آن سایر افراد جامعه تأثیرگذار باشند و آموزش‌ها را منتقل نمایند. بنابراین آموزش و مشارکت دادن

دانش‌آموزان و دانشجویان، در جایگاه بهره‌برداران، تصمیم‌گیران و تصمیم‌سازان آینده کشور، علاوه بر تقویت حس مسئولیت‌پذیری در آن‌ها، می‌تواند نسلی با آگاهی و حساسیت نسبت به حفاظت از محیط‌زیست تربیت نمود و موجبات تعمیق باورها و ترویج هنجارهای درست در مدیریت مصرف منابع طبیعی از طریق آن‌ها در سطح خانواده‌ها را فراهم سازد که در دستیابی به توسعه پایدار بسیار قابل توجه است. این پژوهش با هدف بررسی میزان آگاهی و سواد محیط‌زیستی دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی و تحلیل نقش آن در تحقق اهداف توسعه پایدار و صیانت از محیط‌زیست، به مطالعه و تحلیل داده‌های مرتبط پرداخته است.

لذا نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمایی برای سیاست‌گذاران آموزشی و محیط‌زیستی در جهت طراحی برنامه‌های آموزشی هدفمند و ارتقاء فرهنگ محیط‌زیستی در دانشگاه‌ها باشد. بنابراین توصیه می‌شود با استفاده از منابع آموزشی مناسب نسبت به فرهنگ‌سازی و افزایش آگاهی دانش‌آموزان و دانشجویان در ارتباط با نقش و اهمیت منابع طبیعی و محیط‌زیست و ارتقای فرهنگ و سواد محیط‌زیست و صیانت از آن در مدارس و دانشگاه‌ها اقدامات لازم صورت پذیرد تا سهم مشارکت و احساس مسئولیت آحاد ملت در قبال حمایت و صیانت از محیط‌زیست افزایش و دستیابی به توسعه پایدار مشاهده گردد.

تشکر و قدردانی:

نویسنده این مقاله مراتب قدردانی خود را از تمامی دانشجویان فهیم و ارزشمند دانشگاه آزاد اسلامی استان فارس که در انجام این تحقیق مشارکت داشته‌اند اعلام می‌نماید.

References

1. Abbas MY. Modern system of garbage disposal in Lovely Professional University Phagwara. *International Journal for Innovative Research and Studies*. 2013;3(4):6.
2. Abbas MY, Singh R. A survey of environmental awareness, attitude, and participation amongst university students: A case study. *International Journal of Science and Research*. 2014 May;3(5):1755-60.
3. Ahmadi S, Reisi M. Sustainable Development in Higher Education: An Effort Towards Developing Green Universities. *Environmental Researches*. 2025 Mar 16;15(30):37-54. [In Persian] doi.org/ 10.22034/eiap.2025.217487
4. Caniglia BS, Jorgenson A, Malin SA, Peek L, Pellow DN, Huang X, editors. *Handbook of environmental sociology*. Cham: Springer; 2021 Nov 1.
5. Cao F, Jian Y. The Role of integrating AI and VR in fostering environmental awareness and enhancing activism among college students. *Science of the Total Environment*. 2024 Jan 15;908:168200. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168200
6. Dunlap RE, Jones RE. Environmental concern: Conceptual and measurement issues. *Handbook of environmental sociology*. 2002 Oct;3(6):482-524.
7. Filho, W. About the Role of Universities and Their Contribution to Sustainable Development. *High Educ Policy* 24, 427–438 (2011). <https://doi.org/10.1057/hep.2011.16>
8. Hasani, R. Investigating the Effect of Environmental Awareness on Environmental Behavior with Emphasis on the Mediating Role of Environmental Concern and Connectedness to Nature. *Journals of Environmental Education and Sustainable Development*, 2025; 13(3): 171-191. doi: 10.30473/ee.2025.58507.2356
9. Hollweg KS, Taylor JR, Bybee RW, Marcinkowski TJ, McBeth WC, Zoido P. Developing a framework for assessing environmental literacy. Washington, DC: North American Association for Environmental Education. 2011 Feb 13;122.
10. Ibrahim AN, Asmawi MZ. the Level of Awareness towards Environmental Issues among Students in Tertiary Level. Case Study of University Students in Kuala Lumpur and Klang Valley of Malaysia. 2012.
11. Jabbour, C. J. C., de Sousa Jabbour, A. B. L., Govindan, K., Teixeira, A. A., and de Souza Freitas, W. R. "Environmental management and operational performance in automotive companies in Brazil: the role of human resource management and lean manufacturing". *Journal of Cleaner Production*, (2013). 47, 129-140. doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.010
12. Kaiser FG, Fuhrer U. Ecological behavior's dependency on different forms of knowledge. *Applied psychology*. 2003 Oct;52(4):598-613. <https://doi.org/10.1080/00958960903210031>
13. Ko DG, Dennis AR. Profiting from knowledge management: The impact of time and experience. *Information Systems Research*. 2011 Mar;22(1):134-52. doi.org/10.1287/isre.1090.0247
14. Maigari AI. Introduction to environmental problems and management. Wa'adallah Environmental Consults (WADEC) Kano State, Nigeria. NEST (1991) Nigeria's Threatened Environment. Ibadan, Nigeria. 2002.
15. McBeth W, Volk TL. The national environmental literacy project: A baseline study of middle grade students in the United States. *The journal of environmental education*. 2009 Oct 14;41(1):55-67. doi.org/10.1080/00958960903210031
16. Mihanpour H, Khashij M, Shamsizadeh Z, Gholami M, Ebrahimi A, Rezaeipandari H, Malekhamadi R, Arsham A, Parizan F, Jafari V. Assessment of environmental literacy: A case study of Yazd citizens' awareness, attitudes, and practices in 2017. *Journal of Community Health Research*. 2020 Sep 23. doi.org/10.18502/jchr.v9i3.4272
17. Mirfardi A, Salamatian D. Environmental Behavior of Shiraz University Students and its Relationship with Environmental Concern and Environmental Awareness Informative Resources. *Journals of Environmental Education and Sustainable Development*. 2022 Feb 20;10(2):135-51. doi.org/10.30473/ee.2022.46127.2017
18. Mkumbachi RL, Astina IK, Handoyo B. Environmental awareness and pro-environmental behavior: A case of university students in Malang city. *Jurnal Pendidikan Geografi: Kajian, Teori, dan Praktek dalam Bidang Pendidikan dan Ilmu Geografi*. 2024;25(2):6. doi.org/10.17977/um017v25i22020p161
19. Monroe MC. Two avenues for encouraging conservation behaviors. *Human Ecology Review*. 2003 Dec 1:113-25, <https://www.jstor.org/stable/24706961>
20. Rieckmann M. Education for sustainable development goals: Learning objectives. UNESCO publishing; 2017 Mar 20.

21. Salehi, S., Ebrahimi, H. An analysis of students' knowledge and behavior toward water (case study: secondary schools in Mazandaran). *Environmental Sciences*, 2020; 18(2): 41-58. [In Persian]. doi: 10.29252/envs.18.2.41
22. Sasa T, Ahmad WA, Bahtiti NH, Abujaber M, Adeyleh A, Miri O. Assessment level of environmental literacy among applied science private university (ASU) students. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2022 Jul;18(2022):2224-3496.
23. Tajari, T., Tajari, M., Pakzad, S. The Conceptual Model of an Environmental Literacy-Based Curriculum in Iran's Elementary Education System: A Grounded Theory Approach. *Journals of Environmental Education and Sustainable Development*, 2025; 13(2): 9-25. doi: 10.30473/ee.2024.63369.2498
24. Tuncer* G, Ertepinar H, Tekkaya C, Sungur S. Environmental attitudes of young people in Turkey: Effects of school type and gender. *Environmental education research*. 2005 Apr 1;11(2):215-33. doi.org/10.1080/1350462042000338379
25. Veisi H, Lacy M, Mafakheri S, Razaghi F. Assessing environmental literacy of university students: A case study of Shahid Beheshti University in Iran. *Applied Environmental Education & Communication*. 2019 Jan 2;18(1):25-42. doi.org/10.1080/1533015X.2018.1431163
26. Yıldız O, Özdemir D. An Examination of The Relationship Between Social Studies Teachers' Environmental Knowledge and Sustainable Environmental Attitude. *Osmangazi Journal of Educational Research*. 2023 Oct 10;10:135-53. doi.org/ 10.59409/ojer.1370187
27. Ziegler A, Schwarzkopf J, Hoffmann VH. Stated versus revealed knowledge: Determinants of offsetting CO2 emissions from fuel consumption in vehicle use. *Energy Policy*. 2012 Jan 1;40:422-31. Doi.org/10.1016/j.enpol.2011.10.02



Assessing the Level of Environmental Awareness and Literacy among Associate and Bachelor's Degree Students with an Approach to Sustainable Development and Environmental Conservation

Omid Tabiee*

Assistant professor, Department of Environmental science, Ars.C., Islamic Azad University, Arsanjan, Iran

Received: 22 April 2025

Accepted: 10 June 2025

Keywords: Awareness, Ecological Literacy, Environmental Literacy, Conservation, Sustainable Development

Extended Abstract

Introduction: One of the most crucial and fundamental factors influencing the health and quality of life of current and future generations is a healthy and sustainable environment and its protection. Sustainable development, defined as meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs, is directly linked to individuals' awareness, positive attitudes, active participation, and behaviors regarding the environment. Therefore, to mitigate environmental crises and promote its protection, the present study was conducted to assess the level of environmental awareness and literacy among associate and bachelor's degree students concerning the recognition and importance of environmental conservation.

Materials and Methods: This study was a descriptive-analytical cross-sectional investigation. The sample consisted of 384 students enrolled in associate and bachelor programs at Islamic Azad University, Fars Province, who were selected through convenience sampling. Participants were asked to complete questionnaires that included demographic questions as well as items assessing their general knowledge and awareness about the environment and its protection. The questionnaire's reliability was confirmed prior to the study (Cronbach's alpha = 0.81). Data were analyzed using SPSS version 26 employing descriptive statistics and inferential tests including Chi-square (χ^2), Mann-Whitney, and Kruskal-Wallis tests.

Results and Discussion: Findings revealed that 89.32% of the students demonstrated low awareness regarding the concept of environmental literacy and its importance. Conversely, 90.62% expressed a willingness to increase their knowledge and awareness about the environment and its role in health. Statistically significant relationships were found between gender and awareness, education level and awareness, as well as age group and awareness ($p < 0.05$).

Conclusion: The results indicate that the participating students possess limited knowledge concerning environmental literacy and the significance of environmental protection and sustainable development. Accordingly, there is a clear need for regular, extensive, and systematic educational programs aimed at enhancing environmental literacy and culture as well as sustainable development. It is essential that all members of society become familiar with the concept of ecological or environmental literacy to make informed decisions regarding environmental conservation.

Corresponding author: Omid Tabiee**Address:** Assistant professor, Department of Environmental science, Ars.C., Islamic Azad University, Arsanjan, Iran**Tel:** +989173172710 **Email:** Omid.Tabiee@iau.ac.ir**Citation:** Tabiee O. Assessing the Level of Environmental Awareness and Literacy among Associate and Bachelor's Degree Students with an Approach to Sustainable Development and Environmental Conservation. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 9(3): 18-28.

© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.



تأثیر قابلیت پویایی سبز و مقررات زیست محیطی بر استراتژی کسب و کار با نقش میانجی نوآوری مسئولانه و نقش تعدیل گر اخلاق محیطی

غفار تاری*

مجید پابرجای زنجانی

سجاد محبی

استادیار، گروه مدیریت، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، آذربایجان شرقی، ایران

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت بازرگانی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، آذربایجان شرقی، ایران

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت بازرگانی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه: مقررات زیست محیطی و توسعه قابلیت های پویایی سبز به عنوان عواملی کلیدی در دستیابی به مزیت رقابتی پایدار و تضمین بقا استراتژی های تجاری سبز شناخته می شوند. مدیران سازمان ها باید با شناخت اهمیت این موضوع، توجه ویژه ای به شناسایی و رفع موانع استقرار این قابلیت ها داشته باشند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

مواد و روش ها: این پژوهش با هدف بررسی تأثیر قابلیت پویایی سبز و مقررات زیست محیطی بر استراتژی کسب و کار با نقش میانجی نوآوری مسئولانه و نقش تعدیل گر اخلاق محیطی شرکت انجام شد. پژوهش حاضر از لحاظ هدف کاربردی و از لحاظ روش پژوهش توصیفی-پیمایشی می باشد که برای تجزیه و تحلیل داده ها از مدل سازی معادلات ساختاری استفاده شده است. جامعه آماری این پژوهش را کارمندان و مدیران فعال در عرضه ساخت و ساز در شهر تبریز تشکیل دادند که براساس نظر هومن (۱۳۸۴) و در مدلیابی معادلات ساختاری باید از حداقل ۵ برابر تعداد سوالات و حداکثر ۱۵ برابر تعداد سوالات نمونه گرفته شود که در پژوهش حاضر با توجه به تعداد ۲۴ سوال پژوهش، تعداد ۲۴۰ نمونه به روش نمونه گیری احتمالی برای تجزیه و تحلیل داده ها انتخاب شدند.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

نتایج و بحث: نتایج تجزیه و تحلیل داده ها در سطح اطمینان ۰/۹۵ و در سطح معناداری ۰/۰۵ نشان داد که مقررات زیست محیطی بر استراتژی کسب و کار تأثیرگذار است. همچنین نقش میانجی نوآوری مسئولانه در بین دو متغیر قابلیت پویایی سبز و استراتژی کسب و کار مورد تأیید قرار گرفت. از سوی دیگر اخلاق زیست محیطی رابطه بین قابلیت های پویایی سبز و نوآوری مسئولانه را تعدیل می کند.

واژه های کلیدی: قابلیت پویایی

سبز، مقررات زیست محیطی،

استراتژی کسب و کار، نوآوری

مسئولانه، اخلاق محیطی

نتیجه گیری: در نهایت براساس نتایج می توان بیان کرد وجود مقررات زیست محیطی و لزوم توجه به آن در میان کارمندان و مدیران فعال در عرضه ساخت و ساز مسکن ضروری است.

نویسنده مسئول: غفار تاری

نشانی: استادیار، گروه مدیریت، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، آذربایجان شرقی، ایران **تلفن:** ۰۹۱۴۴۱۷۳۴۴۸ **پست الکترونیکی:** gh_tari@marandiau.ac.ir

استناد: تاری غفار، پابرجای زنجانی مجید، محبی سجاد. تأثیر قابلیت پویایی سبز و مقررات زیست محیطی بر استراتژی کسب و کار با نقش میانجی نوآوری مسئولانه و نقش تعدیل گر اخلاق محیطی. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۴؛ ۳(۹): ۳۸-۲۹.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

امروزه با ظهور انقلاب صنعتی و پیشرفت‌های فناورانه، دغدغه‌ها و نگرانی‌های مرتبط با مسائل زیست‌محیطی افزایش یافته است. از جمله مهم‌ترین نگرانی‌های مطرح می‌توان به گرم شدن کره زمین، تغییرات اقلیمی، جنگل‌زدایی، تخریب لایه اُزون، افزایش ضایعات جامد تجزیه‌ناپذیر و سایر اثرات منفی بر محیط‌زیست اشاره کرد (ویلکایت و همکاران ۲۰۱۹). شدت این چالش‌ها، لزوم توجه جدی به مقوله‌های سلامت محیط‌زیستی و تلاش برای بوم‌سازی فعالیت‌های انسانی را بیش از پیش آشکار ساخته است، به گونه‌ای که بسیاری از جوامع جهانی را به تدوین قوانین و مقررات مختلف در قالب توافق‌نامه‌های بین‌المللی واداشته است (مهرآج و همکاران ۲۰۲۰). بنابراین تصمیمات راهبردی موثر و کارآمد می‌تواند بر اثرات سوء فعالیت‌های صنعتی و کاهش اثرات مخرب آن بر محیط‌زیست تأثیرگذار باشد (حسینی و همکاران ۱۴۰۳). در این راستا، مقررات زیست‌محیطی به عنوان ابزارهای سیاست‌گذاری، نقش به‌سزایی در هدایت سازمان‌ها به سوی توسعه پایدار ایفا می‌کنند. این مقررات، با ایجاد انگیزه‌ها و الزامات قانونی، سازمان‌ها را به اتخاذ استراتژی‌های تجاری سبز ترغیب می‌نمایند (چن، چنگ و همکاران ۲۰۱۳). همچنین مقررات زیست‌محیطی از یک سو برای شرکت‌ها مطلوبیت اجتماعی و از سوی دیگر هزینه مالی به‌همراه دارد (اعظمی و همکاران ۱۳۹۶). مقررات زیست‌محیطی و توسعه قابلیت‌های پویایی سبز به عنوان عواملی کلیدی در دستیابی به مزیت رقابتی پایدار و تضمین بقا استراتژی‌های تجاری سبز شناخته می‌شوند. مدیران سازمان‌ها باید با شناخت اهمیت این موضوع، توجه ویژه‌ای به شناسایی و رفع موانع استقرار این قابلیت‌ها داشته باشند (رضوانی و همکاران ۱۴۰۰). در صنعت ساخت‌وساز، که به عنوان یکی از صنایع پرمصرف منابع و تولیدکننده آلاینده‌های زیست‌محیطی شناخته می‌شود، ترکیب مقررات زیست‌محیطی و قابلیت‌های پویای سبز می‌تواند به توسعه استراتژی‌های تجاری سبز منجر شود. این استراتژی‌ها، با تمرکز بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، بهبود بهره‌وری منابع و ارتقای تصویر سازمانی، مسیر دستیابی به پایداری را هموار می‌سازند (نگوین و همکاران ۲۰۲۳). همچنین، پژوهشگران حوزه مدیریت به‌طور فزاینده‌ای به نقش مقررات زیست‌محیطی در شکل‌گیری استراتژی‌های سبز پرداخته‌اند. فرضیه پورتر (پورتر و لینده ۱۹۹۵) بر این باور است

که مقررات زیست‌محیطی می‌توانند با ایجاد انگیزه برای نوآوری، موقعیت رقابتی شرکت‌ها را ارتقاء دهند (پنگ و همکاران ۲۰۲۱). در نتیجه، این مقررات نه تنها عامل بازدارنده نیستند، بلکه می‌توانند محرک توسعه باشند. با این حال، نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن‌اند که پذیرش منفعلانه یا اجباری مقررات زیست‌محیطی لزوماً منجر به تغییرات واقعی در رفتارهای سازمانی و توسعه استراتژی‌های سبز نمی‌شود (زنگ و همکاران ۲۰۲۲، لیو و شیه ۲۰۲۰). با وجود این، مقررات زیست‌محیطی می‌توانند از طریق کاهش ریسک تخلفات و افزایش بهره‌مندی از منابع، به پایداری کسب‌وکار کمک کنند (لی و همکاران ۲۰۲۳، تان و ژو ۲۰۲۲). اجرای داوطلبانه این مقررات نسبت به پذیرش اجباری، تأثیر مثبت‌تری بر توسعه استراتژی سبز دارد (علی آبادیان و همکاران ۱۴۰۲). مطالعه حاضر بر پایه سه نظریه کلیدی شکل گرفته است. فرضیه پورتر، نظریه قابلیت‌های پویا و دیدگاه مبتنی بر منابع طبیعی. طبق دیدگاه آلمیدا و همکاران (۲۰۲۱)، رویکرد منابع طبیعی اغلب برای بررسی ارتباط بین پایداری زیست‌محیطی و مزیت رقابتی سازمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نظریه که منشأ آن در نظریه منابع طبیعی نهفته است، تأکید دارد که تنها برخورداری از منابع کافی نیست، بلکه نحوه بهره‌برداری راهبردی از آن‌ها نیز اهمیت دارد (هارت ۱۹۹۵، بارنی ۱۹۹۱).

بر همین اساس، این پژوهش نوآوری مسئولانه را به عنوان منبعی راهبردی در نظر می‌گیرد که شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا اخلاق زیست‌محیطی را در فرهنگ و تصمیمات خود نهادینه کرده، و از آن طریق قابلیت‌های پویای سبز و مقررات زیست‌محیطی را به استراتژی‌های سبز تبدیل کنند با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر مقررات زیست‌محیطی و قابلیت‌های پویای سبز بر استراتژی‌های تجاری سبز در صنعت ساخت‌وساز انجام شده است. در این مطالعه، در ابتدا ادبیات و پیشینه پژوهش مرتبط با نقش مقررات زیست‌محیطی، قابلیت‌های پویای سبز و استراتژی‌های تجاری سبز مورد تحلیل قرار گرفته و مؤلفه‌های اصلی استخراج شده‌اند. سپس روش‌شناسی معرفی و مؤلفه‌های اثرگذار مشخص گردیده‌اند. در ادامه با استفاده از تحلیل‌های آماری، روابط میان متغیرها بررسی شده و در نهایت نتایج و پیشنهادات ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

افزایش چشم‌گیر آلودگی‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، تحولی اساسی در صنعت ساخت‌وساز ایجاد کرده است. در نتیجه، شرکت‌های ساختمانی با فشارهای فزاینده‌ای از سوی نهادهای قانون‌گذار مواجه شده‌اند. برنامه‌ریزی بلندمدت دولت در راستای کاهش دی‌اکسید کربن بر اهمیت مدیریت زیست‌محیطی در بخش ساخت‌وساز تأکید ویژه‌ای داشته است. در چنین بستری، پیاده‌سازی استراتژی‌های تجاری سبز به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای شرکت‌های ساختمانی بدل شده است (وانگ و همکاران ۲۰۲۱). این استراتژی‌ها نه تنها به حرکت در مسیر توسعه پایدار کمک می‌کنند، بلکه زمینه‌ساز کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و ارتقاء عملکرد اقتصادی نیز هستند (لین و همکاران ۲۰۲۱).

با توجه به اثرات قابل توجه زیست‌محیطی و اجتماعی فعالیت‌های ساختمانی، دولت اجرای مقررات زیست‌محیطی را تشدید کرده تا شرکت‌ها را به سمت ادغام اهداف زیست‌محیطی در فرآیندهای راهبردی سوق دهد. با این حال، دستیابی به تحول پایدار در صنعت ساخت‌وساز همچنان به‌طور کامل محقق نشده است، زیرا بسیاری از شرکت‌های ساختمانی هنوز زیرساخت‌ها و فرآیندهای خود را برای کاهش کارآمد مصرف انرژی طراحی نکرده‌اند (ژو و همکاران ۲۰۱۹). پژوهش‌های گذشته تأکید کرده‌اند که مقررات زیست‌محیطی و قابلیت‌های پویای سبز نقش کلیدی در تضمین پایداری سازمانی در مواجهه با تغییرات سریع محیطی دارند (شیاو و همکاران ۲۰۲۳، ژینگ و همکاران ۲۰۲۰). از این‌رو، این پژوهش درصدد است تا تأثیر این دو عامل بر استراتژی‌های تجاری سبز در شرکت‌های ساختمانی را بررسی کند.

در حالی که مطالعات متعددی تأثیر سیاست‌ها و ظرفیت سازمانی را بر استراتژی سبز بررسی کرده‌اند (بیگم و همکاران ۲۰۲۳، یوسف و همکاران ۲۰۲۱)، تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که قابلیت‌های پویای سبز می‌توانند به‌شکل مؤثری بر سیاست‌های سازمانی، از جمله سیاست‌های زیست‌محیطی، اثر بگذارند (لئونیداس و همکاران ۲۰۱۷، یوان و چائو ۲۰۲۲).

بر اساس نظریه قابلیت‌های پویا، توانایی سازمان‌ها برای انطباق با تغییرات محیطی از طریق شناخت، بهره‌برداری و دگرگونی منابع تأثیر مستقیمی بر تصمیمات استراتژیک آن‌ها دارد (رندهاوا و همکاران ۲۰۲۱). با این که مطالعات گسترده‌ای درباره پیوند میان این قابلیت‌ها و پایداری انجام شده، هنوز رابطه میان قابلیت پویای سبز و استراتژی تجاری سبز در بستر صنعت ساخت‌وساز به‌طور جامع بررسی نشده است (لیبونی و همکاران ۲۰۲۳). افزون بر آن، پژوهش‌هایی همچون هازاریکا و ژانگ (۲۰۱۹) نشان داده‌اند که شرکت‌ها در مواجهه با ابزارهای نظارتی، نوآوری‌هایی را به‌کار

گرفته‌اند، اما این نوآوری‌ها لزوماً به دلیل فشار مقررات نبوده‌اند. این مسأله اهمیت بررسی مستقیم تأثیر مقررات زیست‌محیطی بر تدوین استراتژی سبز را نشان می‌دهد.

قابلیت نوآورانه برای شرکت‌های کوچک و متوسط نه تنها ضامن بقا، بلکه عامل بهبود عملکرد تجاری است (انینگ دورسون ۲۰۱۶). در محیط‌های تجاری مدرن که بسیار رقابتی و غیرقابل پیش‌بینی‌اند، بنگاه‌ها باید فرصت‌های بازار را به سرعت شناسایی و از آن‌ها بهره‌برداری کنند (سامبامورتی و همکاران ۲۰۰۳).

قابلیت نوآورانه به‌عنوان یک دارایی استراتژیک، امکان ایجاد مزیت رقابتی پایدار و افزایش رشد و عملکرد را فراهم می‌کند (یانگ ۲۰۱۲). نوآوری در فرآیند، شامل اجرای روش‌های تولید یا تحویل جدید یا بهبود یافته از طریق تکنیک‌ها، تجهیزات یا نرم‌افزارها است (دوتا ۲۰۰۵). این نوع نوآوری بر بهبود کارایی از طریق کاهش هزینه‌های عملیاتی تمرکز دارد (کامیسون و ویلار لویز ۲۰۱۴، رضا زاده و داوری ۲۰۱۴).

نظریه قابلیت‌های پویا بیان می‌کند که سازمان‌ها برای پاسخگویی به تغییرات بیرونی، نیازمند قابلیت‌هایی هستند که بتوانند فرصت‌ها را شناسایی، به آن‌ها پاسخ دهند و منابع خود را متناسب با شرایط جدید بازسازی کنند (تیس و همکاران ۲۰۰۷، وینتر، ۲۰۰۳). در این پژوهش، قابلیت‌های پویای سبز به‌عنوان توانمندی‌های سازمانی در زمینه بازپیکربندی منابع با تمرکز بر اهداف زیست‌محیطی تعریف می‌شوند. این قابلیت‌ها شرکت‌ها را قادر می‌سازند تا با تغییرات مداوم قوانین و فشارهای بازار هماهنگ شوند و از طریق سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه، نوآوری مسئولانه را تقویت کنند. بر همین اساس، این پژوهش نوآوری مسئولانه را به‌عنوان منبعی راهبردی در نظر می‌گیرد که شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا اخلاق زیست‌محیطی را در فرهنگ و تصمیمات خود نهادینه کرده و از آن طریق قابلیت‌های پویای سبز و مقررات زیست‌محیطی را به استراتژی‌های سبز تبدیل کنند.

توسعه فرضیه‌ها:

مقررات زیست‌محیطی به‌عنوان ابزاری برای کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی شرکت‌ها را به بازنگری فرآیندهای تولیدی وادار می‌کنند. این مقررات اغلب محرک نوآوری سبز بوده‌اند (کاینلی و همکاران ۲۰۲۰، ژنگ و همکاران ۲۰۲۱). مطالعاتی در کشورهای درحال توسعه (جان وی و همکاران ۲۰۲۱) نیز این اثر را تأیید کرده‌اند. البته برخی پژوهشگران معتقدند که مقررات ممکن است هزینه‌های شرکت‌ها را افزایش دهند و مانعی برای نوآوری باشند (وی هه و همکاران ۲۰۲۰، ژو و همکاران ۲۰۲۱).

فرضیه‌های مبانی:

فرضیه پنجم: نوآوری مسئولانه نقش میانجی در رابطه بین مقررات زیست‌محیطی و استراتژی سبز دارد.

فرضیه ششم: نوآوری مسئولانه نقش میانجی در رابطه بین قابلیت‌های پویای سبز و استراتژی سبز دارد.

نقش تعدیل‌گر اخلاق زیست‌محیطی شرکتی:

اخلاق زیست‌محیطی شرکتی به مجموعه باورها و ارزش‌هایی اشاره دارد که درون سازمان وجود دارد و آن را نسبت به اثرات محیط‌زیستی فعالیت‌هایش حساس می‌کند. این اخلاق می‌تواند شدت رابطه بین محرک‌ها (مقررات یا قابلیت‌ها) و نوآوری مسئولانه را تقویت کند، زیرا شرکت‌هایی که به مسائل زیست‌محیطی اهمیت می‌دهند، به احتمال بیشتری وارد نوآوری‌های سبز می‌شوند.

فرضیه هفتم: اخلاق زیست‌محیطی شرکتی رابطه بین قابلیت‌های پویای سبز و نوآوری مسئولانه را تعدیل می‌کند.

فرضیه هشتم: اخلاق زیست‌محیطی شرکتی رابطه بین مقررات زیست‌محیطی و نوآوری مسئولانه را تعدیل می‌کند.

روش تحقیق در پژوهش حاضر از لحاظ هدف، کاربردی، از لحاظ زمانی، مقطعی و از نظر ماهیت توصیفی از نوع پیمایشی مبتنی بر مدل‌سازی معادلات ساختاری می‌باشد. جامعه آماری پژوهش شامل کارمندان و مدیران شرکت‌های فعال در حوزه ساخت‌وساز در شهر تبریز می‌باشد که تعداد ۳۰۰ نفر از این افراد بر طبق روش نمونه‌گیری احتمالی برای نمونه انتخاب و پرسشنامه استاندارد چن (۲۰۲۴) در یک طیف پنج گانه لیکرت بین آزمودنی‌ها توزیع شد. در بخش آمار توصیفی بیش‌ترین فراوانی به لحاظ جنسیت به مردان با ۱۴۳ نفر، به لحاظ سنی به دامنه سنی ۳۱ تا ۴۰ سال با ۱۰۳ نفر، از لحاظ تحصیلات به مدرک کارشناسی با ۱۴۳ نفر و از لحاظ سابقه شغلی به سابقه کاری ۱ تا ۷ سال با ۱۰۱ نفر اختصاص داشت. همچنین در بخش پایایی همه متغیرهای پژوهش دارای آلفای کرونباخ بالای ۰/۷ و پایایی ترکیبی بالای ۰/۵ بودند. همچنین روایی واگرا به‌وسیله معیار فورنل و لارکر و روایی همگرا به‌وسیله معیار هتروتریت-مونتریت مطلوب ارزیابی شد.

فرضیه اول: مقررات زیست‌محیطی تأثیر مثبتی بر نوآوری مسئولانه دارند.

مقررات زیست‌محیطی همچنین سازمان‌ها را به تدوین استراتژی‌های سبز سوق می‌دهند و فشارهای نهادی می‌توانند نوآوری‌های زیست‌محیطی را تشویق کنند (ژو و همکاران ۲۰۲۱، تاویتیامان پ کیو و ژانگ هی کو ۲۰۱۱). با این حال، تأثیر آن‌ها بر صنعت ساخت‌وساز چین کمتر بررسی شده است.

فرضیه دوم: مقررات زیست‌محیطی تأثیر مثبتی بر استراتژی کسب‌وکار سبز دارند.

بر اساس نظریه قابلیت‌های پویا (دیوید جی و تنسه ۲۰۱۰)، شرکت‌ها باید به‌طور مداوم منابع و فرآیندهای خود را برای انطباق با تغییرات محیطی به‌روز کنند. این قابلیت‌ها شامل درک، تصاحب و تبدیل فرصت‌ها هستند و می‌توانند نوآوری سبز و عملکرد زیست‌محیطی را ارتقاء دهند (سینگ که و همکاران ۲۰۲۲، یوان و چائو ۲۰۲۲). با این حال، برخی مطالعات به محدودیت‌های این قابلیت‌ها اشاره کرده‌اند (آیزنهارت و مارتین ۲۰۰۰).

فرضیه سوم: قابلیت‌های پویای سبز تأثیر مثبتی بر نوآوری مسئولانه دارند.

این قابلیت‌ها همچنین می‌توانند شرکت‌ها را در طراحی و اجرای استراتژی‌های سبز توانمند سازند. اگرچه تحقیقات مستقیم در این زمینه محدود است (لئونیدو و همکاران).

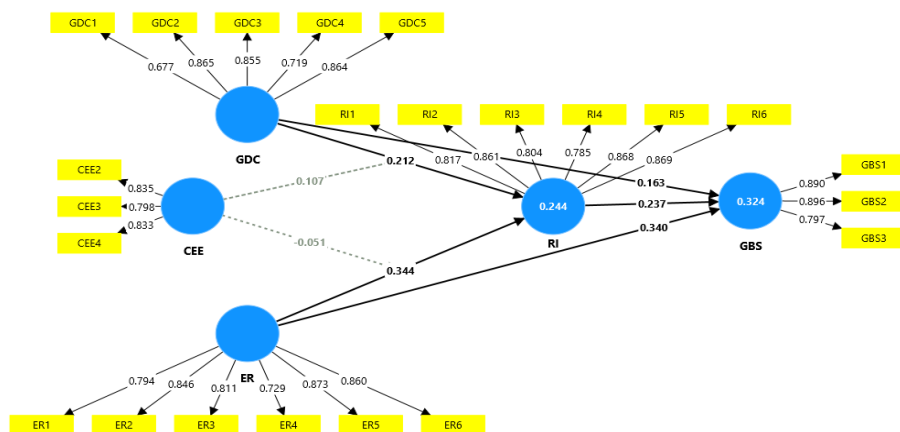
فرضیه چهارم: قابلیت‌های پویای سبز تأثیر مثبتی بر استراتژی کسب‌وکار سبز دارند.

نوآوری مسئولانه به‌عنوان متغیر میانجی

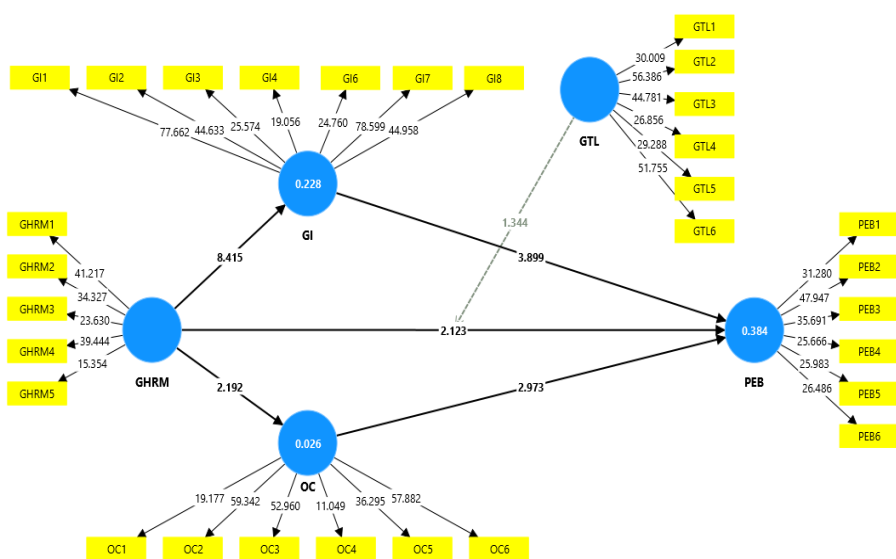
نوآوری مسئولانه می‌تواند نقش واسطه‌ای بین فشارهای بیرونی (مثل مقررات) و استراتژی‌های سبز ایفا کند. این نوع نوآوری موجب بهره‌وری بهتر از منابع و توسعه استراتژی‌های پایدار می‌شود (جیانتی و همکاران ۲۰۲۰، وگتلین و شرر ۲۰۲۰). همچنین ظرفیت‌های فناورانه و سازمانی در این فرآیند اهمیت زیادی دارند (حدج ۲۰۲۰).

نتایج و بحث

در شکل ۱، بارهای عاملی از حداقل ۰/۵ بالاتر است. در شکل ۲، نیز می‌توان معناداری بارهای عاملی را در سطح اطمینان ۰/۹۵ با عدد بالاتر از ۱/۹۶ مشاهده کرد.



شکل ۱- مقدار بارهای عاملی برای سنجش روایی سوالات پرسش‌نامه



شکل ۲- معناداری نتایج مدل پژوهش

مسیر می‌توان نتیجه گرفت که همه فرضیه‌ها به جز فرضیه تعدیل‌گر مورد تایید قرار می‌گیرد.

نتایج پژوهش در جدول ۱، نشان داده شد. با توجه به ضرایب

جدول ۱- خلاصه نتایج پژوهش

نتیجه فرضیه	مقدار تی	ضریب مسیر	فرضیه
تأیید	۵/۴۷۷	۰/۳۴۴	اول
تأیید	۴/۹۴۰	۰/۳۴۰	دوم
تأیید	۳/۲۴۲	۰/۲۱۲	سوم
تأیید	۲/۳۱۷	۰/۱۶۳	چهارم
تأیید	۳/۷۳۴	۰/۲۳۷	پنجم
تأیید	-	میانجی	ششم
تأیید	-	میانجی	هفتم
تأیید	۲/۰۱۳	۰/۱۰۷	هشتم
عدم تأیید	۰/۹۷۹	۰/۰۵۱	نهم

با توجه به اشکال ۱ و ۲ و همچنین جدول ۱، می‌توان نتیجه گرفت همه فرضیه‌ها به جز فرضیه تعدیل گر اخلاق محیطی شرکت

به‌عنوان تعدیل‌کننده بین قابلیت مقررات زیست‌محیطی بر نوآوری مسئولانه مورد تأیید قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر قابلیت پویایی سبز و مقررات زیست‌محیطی بر استراتژی کسب‌وکار با نقش میانجی نوآوری مسئولانه و نقش تعدیل‌گر اخلاق محیطی شرکت در میان شرکت‌های فعال در ساخت‌وساز تبریز انجام شد.

فرضیه اول مبنی بر تاثیر مقررات زیست‌محیطی بر نوآوری مسئولانه مورد تأیید واقع شد. از تحقیقات مشابه می‌توان به پژوهش‌های جباری زاویه و همکاران (۱۴۰۲)، طالبی و همکاران (۱۴۰۲)، راهدارپور و همکاران (۱۴۰۲)، چن و همکاران (۲۰۲۴)، یوانیو گو و همکاران (۲۰۲۴) و غیره مشابهت دارد.

فرضیه دوم مبنی بر تاثیر مقررات زیست‌محیطی بر استراتژی کسب‌وکار مورد تأیید واقع شد. از تحقیقات مشابه می‌توان به پژوهش‌های یوانیو گو و همکاران (۲۰۲۴)، شیائوهان لی و همکاران (۲۰۲۴)، چن و همکاران (۲۰۱۳)، راهدارپور و همکاران (۱۴۰۲)، علیرضایی و همکاران (۱۴۰۱)، نمازی و همکاران (۱۴۰۱) و غیره اشاره کرد. به‌عنوان مثال در پژوهش چن و همکاران (۲۰۲۴) بر تاثیر مقررات زیست‌محیطی بر پویایی سبز و نوآوری تاکید شده بود.

فرضیه سوم مبنی بر تاثیر قابلیت پویا سبز بر نوآوری مسئولانه مورد تأیید واقع شد. از تحقیقات مشابه می‌توان به رشنودی و همکاران (۱۴۰۰)، کشاورز و همکاران (۱۴۰۰)، رستگار و همکاران (۱۴۰۰)، مطیعی و همکاران (۱۴۰۰)، چن و همکاران (۲۰۲۴)، لی و همکاران (۲۰۲۴)، چوتیا و همکاران (۲۰۲۴)، هی و همکاران (۲۰۲۴) و غیره قرار دارد. در تبیین این فرضیه می‌توان گفت

محیط رقابتی امروز به‌دلیل اینکه به شدت درحال تغییر بوده و نوع تغییرات بسیار متنوع شده است، نیازمند قابلیت‌هایی هستند که بتوانند برای بنگاه‌ها مزیت رقابتی و نوآوری به‌وجود آورند.

فرضیه چهارم مبنی بر تاثیر قابلیت پویا سبز بر استراتژی کسب‌وکار مورد تأیید واقع شد. از تحقیقات مشابه می‌توان به پژوهش‌های جباری زاویه و همکاران (۱۴۰۲)، چن و همکاران (۲۰۲۴)، یوانیو گو و همکاران (۲۰۲۴) و غیره مشابهت دارد. **فرضیه پنجم** مبنی بر تاثیر نوآوری مسئولانه بر استراتژی کسب‌وکار مورد تأیید واقع شد. از تحقیقات مشابه می‌توان به پژوهش‌های یوانیو گو و همکاران (۲۰۲۴)، چن و همکاران (۲۰۲۴)، نمازی و همکاران (۱۴۰۱) و غیره اشاره کرد. به‌عنوان نمونه در پژوهش یوانیو گو و همکاران (۲۰۲۴) به تاثیر متقابل بین استراتژی‌های کسب‌وکار شرکت و میزان نوآوری اعمال شده مدیران اشاره شده است.

فرضیه ششم مبنی بر نقش میانجی نوآوری مسئولانه در بین قابلیت پویا سبز و استراتژی کسب‌وکار مورد تأیید واقع شد. از تحقیقات مشابه می‌توان به مطیعی و همکاران (۱۴۰۰) یا چن و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد.

فرضیه هفتم مبنی بر نقش میانجی نوآوری مسئولانه در بین مقررات زیست‌محیطی و استراتژی کسب‌وکار مورد تأیید واقع شد. این فرضیه به‌شکل کامل در تحقیقات داخلی وجود ندارد. از تحقیقات نسبتاً مشابه می‌توان به چن و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد.

قرار دارد. دلیل این عدم مطابقت می‌تواند به کشور مورد مطالعه یا شرکت‌های متفاوت مورد مطالعه مرتبط باشد. در نهایت براساس نتایج مطالعات می‌توان به پژوهشگران دیگر پیشنهاد داد این پژوهش را در سایر صنایع، سازمان‌ها و غیره اجرا و نتایج را با نتایج پژوهش حاضر مقایسه کنند. همچنین می‌توان پیشنهاد پژوهشی دیگری مبنی بر افزودن نقش میانجی هوش اخلاقی یا نقش تعدیل‌گر تحصیلات به سایر پژوهشگران ارائه کرد. در همین راستا و برای بهبود وضعیت موجود پیشنهاد می‌شود کلاس‌ها یا همایش‌های رایگان برای مدیران شرکت‌ها جهت آشنایی بیش‌تر با مسائل محیط‌زیستی برقرار گردد.

فرضیه هشتم مبنی بر نقش تعدیل‌گر اخلاق محیطی شرکت در بین قابلیت پویا سبز و نوآوری مسئولانه مورد تایید واقع شد. این پژوهش به‌شکل کامل در تحقیقات داخلی وجود ندارد. از تحقیقات مشابه می‌توان به چن و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد. تعدیل‌گر بودن اخلاق محیطی شرکت می‌تواند رابطه بین قابلیت پویا سبز و نوآوری را در میان افراد بهبود ببخشد و آن را تقویت کند. **فرضیه نهم** مبنی بر نقش تعدیل‌گر اخلاق محیطی شرکت در بین قابلیت مقررات زیست‌محیطی بر نوآوری مسئولانه مورد تایید واقع نشد. این فرضیه برخلاف پژوهش چن و همکاران (۲۰۱۳)

References

1. Ali Abadian, Ali, Khamsa, Abbas, Zamani Moghadam, Afsaneh, and Hosseini Shakib, Mehrdad (2023). Identification and ranking of key factors affecting value creation based on innovation economy in knowledge-based information technology companies. *Program and Development Research*, 4(13), 39-66. [In Persian] 10.22034/pbr.2023.362913.1273
2. Azimi, Somayeh, Almasi, Mojtaba, and Gol Mohammadi, Afsaneh (2017). The impact of environmental regulations on the competitiveness of industries: Evidence from manufacturing industries in the United States, the United Kingdom, and Canada. *Economic Modeling*, 11(3), 119-139. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/eco/Article/995619/FullText>
3. Barney, J. B., Ketchen, D. J., Wright, M., Hart, S. L., & Dowell, G. (2011). Invited editorial: A natural-resource-based view of the firm: Fifteen years after. *Journal of Management*, 37(5), 1464–1479. DOI:10.1177/0149206310390219
4. Begum, S., Ashfaq, M., Asiaei, K., & Shahzad, K. (2023). Green intellectual capital and green business strategy: The role of green absorptive capacity. *Business Strategy and the Environment*. Doi:10.1002/bse.3399
5. Chen, C., & Haron, S. H. (2023). The influence of multistakeholder value cognition and risk attitudes on sustainable interior landscape design decisions. *Sustainability*, 15(3), 2743. Doi:10.3390/su15032743
6. Chen, Y., Li, J., & Zhang, J. (2022). Digitalisation, data-driven dynamic capabilities and responsible innovation: An empirical study of SMEs in China. *Asia Pacific Journal of Management*, 41(3):1211-1251 DOI:10.1007/s10490-022-09845-6
7. Chen, Y.-S., & Chang, C.-H. (2013). The determinants of green product development performance: Green dynamic capabilities, green transformational leadership, and green creativity. *Journal of Business Ethics*, 116, 107–119. DOI:10.1007/s10551-012-1452-x
8. Giannetti, B. F., Agostinho, F., Eras, J. J. C., Yang, Z., & Almeida, C. M. V. B. (2020). Cleaner production for achieving the sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122127. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122127
9. Hadj, T., Omri, A., & Al-Tit, A. (2020). Mediation role of responsible innovation between CSR strategy and competitive advantage: Empirical evidence for the case of Saudi Arabia enterprises. *Management Science Letters*, 10(4), 747–762. DOI: 10.5267/j.msl.2019.10.022
10. Hazarika, N., & Zhang, X. (2019). Factors that drive and sustain eco-innovation in the construction industry: The case of Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117816.
11. He, W., Tan, L., Liu, Z. J., & Zhang, H. (2020). Property rights protection, environmental regulation and corporate financial performance: Revisiting the Porter Hypothesis. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121615. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3740853>
12. Hosseini, Mohammad; Shabani, Mohammad; Karami, Mehrdad. (2025) Assessment of Environmental Impacts of Starting the Hot Rolling Production Line of Pasargad Steel Factory Using Rapid Assessment Matrix Method. *Journal of New Research in Environmental Engineering*, Volume: 2, Issue: 8. <https://civilica.com/doc/2296529>
13. Lin, H., Chen, L., Yu, M., Li, C., Lampel, J., & Jiang, W. (2021). Too little or too much of good things? The horizontal S-curve hypothesis of green business strategy on firm performance. *Technological Forecasting and Social Change*, 172, 121051. DOI:10.1016/j.techfore.2021.121051
14. Peng, H., Shen, N., Ying, H., & Wang, Q. (2021). Can environmental regulation directly promote green innovation behavior? Based on situation of industrial agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128044. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.128044
15. Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118. DOI: 10.1257/jep.9.4.97
16. Randhawa, K., Wilden, R., & Gudergan, S. (2021). How to innovate toward an ambidextrous business model? The role of dynamic capabilities and market orientation. *Journal of Business Research*, 130, 618–634. DOI:10.1016/j.jbusres.2020.05.046
17. Rezvani, Mehran, Amin Shakouri, Negar, and Rezaei, Marzieh (2021). Identifying the impact of dynamic capabilities on the adoption and success of internationalization strategies (Case study: Kashi Marjan Company). *International Business Management*, 4(1), 43-65. [In Persian] 10.22034/jiba.2021.42036.1529
18. Scherer, A. G., & Voegtlin, C. (2020). Corporate governance for responsible innovation: Approaches to corporate governance and their implications for sustainable development. *Academy of Management Perspectives*, 34(2), 182–208. <https://doi.org/10.5465/amp.2017.0175>
19. Singh, S. K., Del Giudice, M., Chiappetta Jabbour, C. J., Latan, H., & Sohal, A. S. (2022).

- Stakeholder pressure, green innovation, and performance in small and medium-sized enterprises: The role of green dynamic capabilities. *Business Strategy and the Environment*, 31(1), 500–514. DOI: 10.1002/bse.2906
20. Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350. DOI:10.1002/smj.640
 21. Teece, D. J. (2010). Business models, business strategy and innovation. *Long Range Planning*, 43(2), 172–194. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5092645>
 22. Xiaoyi, Z., Yang, H., Kumar, N., Bhutto, M. H., Kun, W., & Hu, T. (2023). Assessing Chinese textile and apparel industry business sustainability: The role of organization green culture, green dynamic capabilities, and green innovation in relation to environmental orientation and business sustainability. *Sustainability*, 15(11), 8588. <https://doi.org/10.3390/su15118588>
 23. Yousaf, Z., Radulescu, M., Sinisi, C. I., Serbanescu, L., & Paunescu, L. M. (2021). Harmonization of green motives and green business strategies towards sustainable development of hospitality and tourism industry: Green environmental policies. *Sustainability*, 13(12), 6592. <https://doi.org/10.3390/su13126592>
 24. Zeng, H., Li, X., Zhou, Q., & Wang, L. (2022). Local government environmental regulatory pressures and corporate environmental strategies: Evidence from natural resource accountability audits in China. *Business Strategy and the Environment*, 31(7), 3060–3082. DOI: 10.1002/bse.3064
 25. Zheng, Y., Li, C., & Liu, Y. (2021). Impact of environmental regulations on the innovation of SMEs: Evidence from China. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101515. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101515>
 26. Zhou, M., Govindan, K., Xie, X., & Yan, L. (2021). How to drive green innovation in China's mining enterprises? Under the perspective of environmental legitimacy and green absorptive capacity. *Resources Policy*, 72, 102038. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102038>
 27. Zhou, Y., Liu, W., Lv, X., Chen, X., & Shen, M. (2019). Investigating interior driving factors and cross-industrial linkages of carbon emission efficiency in China's construction industry: Based on Super-SBM DEA and GVAR model. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118322. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118322
 28. Zhu, Y., Sun, Z., Zhang, S., & Wang, X. (2021). Economic policy uncertainty, environmental regulation, and green innovation: An empirical study based on Chinese high-tech enterprises. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9503. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189503>



The Impact of Green Dynamic Capability and Environmental Regulations on Business Strategy with the Mediating Role of Responsible Innovation and the Moderating Role of Corporate Environmental Ethics

Ghaffar Tari*

Assistant Professor, Department of Management, Marand Branch, Islamic Azad University, Azarbayegan sharghi, Iran.

Majid Pabarjaei Zanjani

PhD student, Department of Business Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Azarbayegan sharghi, Iran.

Sajjad Mohebi

PhD student, Department of Business Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Azarbayegan sharghi, Iran.

Received: 30 April 2025

Accepted: 18 June 2025

Keywords: Green dynamic capabilities, environmental regulations, business strategy, responsible innovation, environmental ethics.

Extended Abstract

Introduction: Environmental regulations and the development of green dynamic capabilities are recognized as key factors in achieving sustainable competitive advantage and ensuring the survival of green business strategies. Organizational managers must recognize the importance of this issue and pay special attention to identifying and overcoming the barriers to establishing these capabilities.

Materials and Methods: This research aims to investigate the impact of green dynamic capabilities and environmental regulations on business strategy, with the mediating role of responsible innovation and the moderating role of corporate environmental ethics. The study is applied in purpose and descriptive-survey in method, utilizing structural equation modeling for data analysis. The statistical population of this research consists of employees and managers active in the construction industry in Tabriz. According to Hooman (2005), in structural equation modeling, a sample size must be at least 5 times and at most 15 times the number of questions. Given the 24 questions in this research, a sample of 240 was selected using probabilistic sampling for data analysis.

Results and Discussion: The results of data analysis at a confidence level of 0.95 and a significance level of 0.05 indicated that environmental regulations significantly impact business strategy. Moreover, the mediating role of responsible innovation between the variables of green dynamic capabilities and business strategy was confirmed. On the other hand, corporate environmental ethics moderates the relationship between green dynamic capabilities and responsible innovation.

Conclusion: Ultimately, based on the results, it can be stated that the existence of environmental regulations and the necessity of paying attention to them among employees and managers active in the residential construction sector is essential.

Corresponding author: Ghaffar Tari

Address: Assistant Professor, Department of Management, Marand Branch, Islamic Azad University, Azarbayegan sharghi, Iran.

Tel: +989144173448

Email: gh_tari@marandiau.ac.ir

Citation: Tari Gh, Pabarjaei Zanjani M, Mohebi S. The Impact of Green Dynamic Capability and Environmental Regulations on Business Strategy with the Mediating Role of Responsible Innovation and the Moderating Role of Corporate Environmental Ethics. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 3(9): 29-38.



© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.



ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت و ساز ساختمان با در نظر گرفتن ملاحظات

زیست محیطی

محمد بهرامی کیا

محمد امیر شرافتی*

کارشناسی ارشد مهندسی عمران واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

گروه عمران واحد شیراز، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه: صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از بزرگ ترین بخش های اقتصادی جهان، سهم قابل توجهی در مصرف منابع، انرژی و تولید گازهای گلخانه ای دارد. فعالیت های ژئوتکنیکی مانند خاک برداری، بهسازی زمین و احداث پی ها به دلیل مصرف بالای انرژی و مواد، نقش کلیدی در تأثیرات زیست محیطی این صنعت ایفا می کنند. ارزیابی چرخه عمر (LCA) به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل این تأثیرات در تمام مراحل عمر پروژه های ساختمانی شناخته شده است. این مقاله مروری با هدف بررسی کاربرد ارزیابی چرخه عمر در فعالیت های ژئوتکنیکی، شناسایی فناوری های پایدار (مانند مصالح بازیافتی و روش های کم کربن)، و تحلیل چالش های موجود در این حوزه تدوین شده است.

مواد و روش ها: این مطالعه با استفاده از روش مرور نظام مند، مقالات معتبر (۲۰۱۰-۲۰۲۵) از پایگاه های داده علمی را با کلیدواژه های مرتبط بررسی کرده است. پس از غربالگری بر اساس معیارهای کیفیت و ارتباط، داده های مربوط به روش های ارزیابی، شاخص های زیست محیطی و فناوری های نوین استخراج شد. تحلیل کیفی شامل مقایسه تطبیقی یافته ها، شناسایی چالش ها و ارائه راهکارها بوده و نتایج در قالب جداول مقایسه ای ارائه گردید.

نتایج و بحث: نتایج این مطالعه مروری نشان می دهد که فعالیت های ژئوتکنیکی (خاک برداری، بهسازی زمین و پی سازی) سهم قابل توجهی در مصرف انرژی (۱۵۰ تا ۱۸۰۰ مگاژول بر تن) و انتشار کربن (۱۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر تن) دارند. بررسی فناوری های نوین مانند خاک های مسلح با الیاف بازیافتی، شمع های کم کربن و روش های بهسازی بیولوژیک، مزایای زیست محیطی قابل توجهی را نشان می دهد، اما با چالش هایی مانند هزینه های بالای اولیه و محدودیت های فنی مواجه هستند. تحلیل استانداردهای بین المللی حاکی از عدم وجود چارچوب یکپارچه برای ارزیابی چرخه عمر فعالیت های ژئوتکنیکی است. یافته ها بر نیاز به توسعه شاخص های اختصاصی برای کیفیت خاک و خدمات اکوسیستمی و همچنین ایجاد پایگاه های داده ی دقیق تر تأکید دارند. این مطالعه راهکارهای عملی مانند بهینه سازی روش های اجرایی، مدیریت پسماند و استفاده از مصالح پایدار را برای کاهش اثرات زیست محیطی پیشنهاد می کند.

نتیجه گیری: این مطالعه مروری نشان می دهد که فعالیت های ژئوتکنیکی نقش تعیین کننده ای در پایداری زیست محیطی پروژه های ساختمانی دارند. یافته ها حاکی از آن است که رویکردهای نوین مانند استفاده از مصالح بازیافتی و روش های کم کربن می توانند تا ۴۰٪ از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای بکاهند. با این وجود، موانع مهمی از جمله نبود چارچوب های ارزیابی یکپارچه، کمبود داده های معتبر و هزینه های بالای اجرایی وجود دارد. توسعه استانداردهای اختصاصی برای ارزیابی چرخه عمر فعالیت های ژئوتکنیکی، سرمایه گذاری در تحقیقات کاربردی برای کاهش هزینه های فناوری های پایدار، و ایجاد بانک های اطلاعاتی جامع برای تسهیل تصمیم گیری های مهندسی از جمله موارد پیشنهادی جهت بهبود مدیریت چرخه عمر این فعالیت ها است. این اقدامات می تواند صنعت ساخت و ساز را به سوی تحقق اهداف توسعه پایدار هدایت کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

واژه های کلیدی: ارزیابی

چرخه عمر، کارهای ژئوتکنیکی، ساخت و ساز پایدار، تأثیرات زیست محیطی

نویسنده مسئول: محمد امیر شرافتی

نشانی: گروه عمران واحد شیراز، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران | تلفن: ۰۹۱۷۳۸۷۰۰۱۴ | پست الکترونیکی: MA.Sherafati@iau.ac.ir

استاد: بهرامی کیا محمد، شرافتی محمد امیر. ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت و ساز ساختمان با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست، ۱۴۰۴؛ ۳(۹): ۵۱-۳۹.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

فعالیت‌های ساختمانی عمرانی یکی از بخش‌های بزرگ در اقتصاد به‌شمار می‌رود. بر اساس آمار بانک جهانی سهم این بخش از اقتصاد جهان بین ۶ الی ۱۳ درصد گزارش شده است (بانک جهانی اقتصاد ۲۰۲۵). هم‌چنین این بخش سهم ۷ درصدی (۱۷۴ میلیون نفر شاغل فعال) از اشتغال جهانی را به خود اختصاص داده است (تیلور ۲۰۲۴). این بخش حدود ۵۰ درصد مواد خام استخراج شده (هرتویچ ۲۰۲۱) ۴۰ درصد انرژی مصرفی دنیا و ۳۵ درصد گازهای گلخانه‌ای تولید شده در جهان را به خود اختصاص داده است. همه این آمار و ارقام‌ها نشان‌دهنده اهمیت ویژه بخش عمرانی و ساخت‌وساز دارد.

بررسی چرخه عمر فعالیت‌های ژئوتکنیکی در پروژه‌های ساختمانی اهمیت ویژه‌ای در دستیابی به ساخت‌وساز پایدار دارد. مطالعات نشان می‌دهند که فرآیندهای ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی زمین و احداث پی‌ها، به‌طور قابل‌توجهی انرژی و منابع مصرف می‌کنند (سانگ ۲۰۲۰). ارزیابی چرخه عمر^۱ به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تحلیل تأثیرات زیست‌محیطی این فعالیت‌ها در طول دوره عمر ساختمان‌ها معرفی شده است. با استفاده از ارزیابی چرخه عمر، می‌توان راهکارهایی برای کاهش مصرف منابع و انرژی در مراحل اولیه ساخت‌وساز پیشنهاد داد، که این امر به بهبود پایداری کلی پروژه‌های ساختمانی کمک می‌کند (هاکین ۲۰۲۰).

ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیکی نقش مهمی در شناسایی و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با عملیات خاکی، پی‌سازی و بهسازی زمین ایفا می‌کند. این روش با تحلیل مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از منابع طبیعی و تولید ضایعات در تمامی مراحل از استخراج مواد اولیه تا پایان عمر سازه، امکان تصمیم‌گیری‌های بهینه برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی را فراهم می‌آورد (می‌ملو ۲۰۲۴). ملاحظات زیست‌محیطی در ارزیابی چرخه عمر ژئوتکنیکی شامل انتخاب مصالح پایدار، مدیریت پسماندهای ساختمانی و به‌کارگیری فناوری‌های کم‌مصرف انرژی است که به حفظ منابع طبیعی و کاهش آلودگی‌ها کمک می‌کند و در نهایت به توسعه ساخت‌وساز پایدار می‌انجامد (پتینارولی ۲۰۲۳). در این مقاله به‌صورت جامع تأثیر ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت‌وساز ساختمان بر محیط‌زیست بررسی می‌شود.

فرضیات این مقاله بر این اساس استوار است که فعالیت‌های ژئوتکنیکی در صنعت ساخت‌وساز سهم قابل‌توجهی در مصرف

انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و ارزیابی چرخه عمر می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای کاهش این تأثیرات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین، فناوری‌های نوین مانند مصالح بازیافتی و روش‌های کم‌کربن قادرند تا حد زیادی از مصرف منابع و آلودگی‌ها بکاهند، اما چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا و محدودیت‌های فنی مانع از گسترش آن‌ها شده است. سانگ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای، اثر چرخه عمر بر فعالیت‌های ژئوتکنیکی مرتبط با ساختمان را بررسی نمودند. در این مطالعه فرآیندهای ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی زمین و ساخت فونداسیون‌ها جزو فعالیت‌های پر مصرف از نظر انرژی و منابع دسته‌بندی شدند. بنابراین، این عملیات می‌توانند نقش کلیدی در دستیابی به روش‌های ساخت‌وساز پایدارتر ایفا کنند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد ارزیابی چرخه عمر در بخش زیرساخت ساختمان‌ها هنوز در حال توسعه است و از انسجام کافی برخوردار نیست. نیاز به یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی چرخه حیات عملیات ژئوتکنیکی در ساخت‌وساز احساس می‌شود. به‌ویژه در تعریف واحد عملکردی، انتخاب مرزهای سیستم، داده‌های موجودی مناسب و انتخاب دسته‌بندی‌های تأثیر محیط‌زیستی. ساموئلسون (۲۰۲۳) روش‌شناسی ادغام ارزیابی چرخه عمر و تحلیل هزینه چرخه عمر در فرآیند طراحی ژئوتکنیکی را بررسی نموده است. هم‌چنین، روشی برای ارزیابی طرح‌های ژئوتکنیکی مختلف به منظور انتخاب پایدارترین طراحی بر اساس نتایج تحلیل چرخه عمر و هزینه چرخه عمر ارائه شده است. ریموند و همکاران (۲۰۲۰) دسته‌بندی‌های تأثیر و شاخص‌های زیست‌محیطی در ارزیابی چرخه عمر سیستم‌های ژئوتکنیکی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که ارزیابی‌های فعلی عمدتاً بر روی مصرف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی متمرکز هستند و تأثیرات مرتبط با منابع خاک و زمین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. نویسندگان بر لزوم توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی مرتبط با کیفیت خاک، عملکردهای خاک و خدمات اکوسیستمی آن تأکید کردند. هم‌چنین، نیاز به تطبیق روش‌های ارزیابی از مقیاس کلان به مقیاس پروژه‌های ژئوتکنیکی برای بهبود دقت تحلیل‌ها مطرح شد. مدل مفهومی ارائه‌شده بر جریان‌های موجودی و مرزهای سیستم تمرکز دارد و می‌تواند مبنایی برای تعیین دامنه مطالعات آینده ارزیابی چرخه عمر در کارهای ژئوتکنیکی باشد. هم‌چنین، این مدل می‌تواند به بهبود ارتباط مؤثر بین ذینفعان مختلف در زمینه پایداری

فعالیت‌های ژئوتکنیکی، شناسایی فناوری‌های پایدار و تحلیل چالش‌های موجود در این حوزه است تا با ارائه راهکارهای عملی، گامی در جهت تحقق ساخت و ساز پایدار برداشته شود.

محیط‌زیستی در بخش ساخت و ساز کمک کند. علاوه بر مطالعات یاد شده مطالعات دیگری نیز در حوزه تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت که در جدول ۱ خلاصه این نتایج آورده شده است. هدف این مقاله بررسی نظام‌مند کاربرد ارزیابی چرخه عمر در

جدول ۱- مقایسه کارهای تحقیقاتی مختلف چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساختمان

عنوان مطالعه	شاخص‌های زیست‌محیطی مورد بررسی	شیوه‌های تحلیل و محاسبه	نتایج کلیدی
سانگ و همکاران (۲۰۲۰)	تغییرات آب‌وهوایی، اسیدی شدن خاک، اکسیدان‌های فوتوشیمیایی، تخریب اوزون، آلودگی آب، تغییر کاربری زمین	مطالعه مروری	ارزیابی چرخه عمر در ژئوتکنیک هنوز در مراحل ابتدایی است و نیاز به چارچوبی منسجم دارد.
ریموند و همکاران (۲۰۲۰)	مصرف انرژی، پتانسیل گرمایش جهانی، تأثیر بر کیفیت خاک	تحلیل ارزیابی چرخه عمر با تمرکز بر داده‌های ساختمانی	شاخص‌های سنتی کافی نیستند. نیاز به توسعه شاخص‌های مربوط به خدمات خاک وجود دارد.
کلیسگارد و همکاران (۲۰۲۰)	پتانسیل گرمایش جهانی، مصرف منابع، آلودگی هوا	مرور نظام‌مند مطالعات ارزیابی چرخه عمر	فرآیندهای ژئوتکنیکی بسیار مصرف‌گرا هستند و چارچوب یکپارچه‌ای وجود ندارد.
ساموئلسون (۲۰۲۳)	گرمایش جهانی، هزینه زیست‌محیطی مواد و انرژی	ترکیب ارزیابی چرخه عمر و هزینه	مدل مفهومی برای انتخاب طرح‌های ژئوتکنیکی پایدار ارائه شده است.
آذری جعفری و همکاران (۲۰۱۶)	تغییرات اقلیمی، مصرف انرژی اولیه و تجدیدنپذیر	تحلیل مقایسه‌ای بتن‌ها با استفاده از ارزیابی چرخه عمر	انتخاب نوع مصالح ژئوتکنیکی تأثیر زیادی بر کل عملکرد زیست‌محیطی دارد.
دو و همکاران (۲۰۱۴)	مصرف انرژی، تولید CO ₂ ، بهره‌وری منابع	مدل‌سازی فرآیند ساخت فونداسیون با نرم‌افزار SimaPro	فاز ساخت در فعالیت‌های ژئوتکنیکی بیش‌ترین تأثیر زیست‌محیطی را دارد.
هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)	آلودگی خاک و آب، مصرف منابع	تحلیل چرخه عمر برای بهسازی زمین با افزودنی‌های شیمیایی	روش‌های بهسازی پایدار، اثرات زیست‌محیطی کم‌تری نسبت به روش‌های سنتی دارند.

مواد و روش‌ها

به روش‌های ارزیابی، شاخص‌های زیست‌محیطی، فناوری‌های نوین و استانداردهای بین‌المللی استخراج و دسته‌بندی شدند. برای تحلیل داده‌ها از روش‌های کیفی شامل مقایسه تطبیقی یافته‌ها، شناسایی چالش‌های مشترک و استخراج راهکارهای پیشنهادی استفاده شد. همچنین، جداول مقایسه‌ای برای نمایش نتایج تحقیقات مختلف، ویژگی‌های فناوری‌های ژئوتکنیکی و استانداردهای ارزیابی چرخه عمر طراحی شدند تا دیدگاه جامعی از وضعیت موجود و گپ تحقیقاتی ارائه شود. در نهایت، یافته‌ها با توجه به اهداف تحقیق و ادبیات موضوع تفسیر و جمع‌بندی شدند.

در این مقاله مروری، روش تحقیق مبتنی بر بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین در حوزه ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت و ساز ساختمان با تأکید بر ملاحظات زیست‌محیطی است. ابتدا با استفاده از پایگاه‌های داده علمی معتبر مقالات مرتبط با کلیدواژه‌های "ارزیابی چرخه عمر"، "کارهای ژئوتکنیکی"، "ساخت و ساز پایدار"، و "تأثیرات زیست‌محیطی" جمع‌آوری شدند. معیارهای انتخاب مقالات شامل ارتباط مستقیم با موضوع، انتشار در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵، و کیفیت علمی (نمایه شده در مجلات معتبر) بودند. پس از غربال‌گری اولیه، داده‌های مربوط

نتایج و بحث

فعالیت‌های ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی خاک، اجرای فونداسیون‌ها، نصب دیوارهای حائل و پایدارسازی، از مراحل کلیدی و اجتناب‌ناپذیر در هر پروژه ساخت‌وساز محسوب می‌شوند. این عملیات به دلیل استفاده گسترده از ماشین‌آلات سنگین، مصرف سوخت‌های فسیلی، به کارگیری مصالحی که رد کربنی بالایی دارند، مانند سیمان و فولاد، و همچنین دست‌کاری در ساختار طبیعی زمین، نقش قابل توجهی در تولید گازهای گلخانه‌ای، تخریب پوشش گیاهی، آلودگی خاک و مصرف منابع طبیعی دارند (هروتویج ۲۰۲۱). در این میان، تحلیل چرخه عمر به عنوان روشی علمی و استاندارد، امکان ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی این فعالیت‌ها را فراهم می‌سازد. با استفاده از ارزیابی چرخه عمر می‌توان مشخص کرد که در کدام مرحله از فعالیت‌های ژئوتکنیکی - از استخراج مواد اولیه، حمل و نقل، اجرا تا پایان عمر مفید و تخریب - بیش‌ترین آسیب به محیط‌زیست وارد می‌شود. به عنوان مثال، در فرآیند خاک‌برداری، میزان مصرف

سوخت ماشین‌آلات و جابجایی خاک به مکان‌های دور تأثیر زیادی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. در بهسازی خاک، استفاده از افزودنی‌هایی مانند آهک یا سیمان می‌تواند منجر به افزایش پتانسیل گرمایش جهانی و اسیدی شدن خاک شود. همچنین در احداث فونداسیون‌ها، انتخاب نوع سیستم (مثلاً فونداسیون‌های کم‌عمق در مقابل شمع‌های بتنی) اثرات زیست‌محیطی متفاوتی در بر دارد (پنینارولی ۲۰۲۳). کاربرد ارزیابی چرخه عمر در این حوزه می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در طراحی، انتخاب مصالح، روش‌های اجرایی و راهکارهای جایگزین منجر شود و در نهایت به کاهش ردپای زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی کمک کند. از این رو، توسعه چارچوب‌های تحلیلی منسجم و پایگاه‌های داده دقیق برای ارزیابی فعالیت‌های ژئوتکنیکی، گامی حیاتی در جهت تحقق ساخت‌وساز پایدار به‌شمار می‌رود. در جدول ۲ انواع فعالیت‌های ژئوتکنیکی از نظر شاخص‌های چرخه عمر و سازگاری زیست‌محیطی مقایسه شده است.

جدول ۲ - مقایسه انواع فعالیت ژئوتکنیکی از نظر شاخص‌های زیست‌محیطی

فعالیت ژئوتکنیکی	مصرف انرژی (MJ/ton)	انتشار کربن (kg/ton)	مصرف آب (m ³ /ton)	ضایعات تولیدی (kg/ton)	مرجع
خاک‌برداری	۱۵۰-۳۰۰	۱۰-۲۰	۰/۱-۰/۳	۵-۱۰	سانگ و همکاران (۲۰۲۰)
بهسازی زمین (با سیمان)	۸۰۰-۱۲۰۰	۷۰-۱۰۰	۰/۳-۰/۵	۱۰-۲۰	هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)
پی‌سازی (شمع کوبی بتنی)	۱۰۰۰-۱۸۰۰	۱۵۰-۲۵۰	۰/۴-۰/۶	۱۵-۳۰	دو و همکاران (۲۰۱۴)
دیوار حائل بتنی	۹۰۰-۱۵۰۰	۱۲۰-۲۰۰	۰/۵-۰/۷	۲۰-۳۵	آذری جعفری و همکاران (۲۰۱۶)
پایدارسازی شیب‌ها	۵۰۰-۹۰۰	۵۰-۸۰	۰/۲-۰/۴	۱۰-۱۵	کلیسگارد و همکاران (۲۰۲۰)

یکی از راهکارهایی که برای حل چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های ژئوتکنیکی پیشنهاد می‌شود استفاده از مواد و فناوری‌های جدید در این حوزه است. پس از بررسی ادبیات موضوع، شش فناوری احصا گردید. در جدول ۳ شش فناوری مختلف را مورد مقایسه قرار می‌دهد که هر کدام ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. این شش فناوری شامل موارد زیر هستند: **خاک مسلح با الیاف بازیافتی**: این روش شامل استفاده از الیاف بازیافتی برای افزایش استحکام و پایداری خاک در کاربردهایی مانند جاده‌ها، فرودگاه‌ها و سد‌ها است. مزایای زیست‌محیطی آن شامل کاهش نیاز به مصالح جدید و کاهش پسماندهای ساختمانی است. با این حال، چالش‌هایی مانند پیچیدگی و هزینه بازیافت، و کنترل کیفیت الیاف بازیافتی وجود دارد (میزابابایی و ارشد ۲۰۱۸). **شمع‌های کم‌کربن**: این شمع‌ها در فونداسیون سازه‌ها، پایدارسازی شیب‌ها و دیوارهای حائل کاربرد دارند. مزیت اصلی زیست‌محیطی آن‌ها کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با

تولید سیمان و فولاد است. اما ممکن است به فناوری‌های خاص یا مواد افزودنی جدید نیاز داشته باشند و محدودیت‌هایی در ظرفیت باربری و چالش‌های اجرایی در شرایط خاص خاک دارند (هابرت و راسل ۲۰۰۹).

روش‌های بهسازی بیولوژیک: این روش‌ها برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار، افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک استفاده می‌شوند. مزایای زیست‌محیطی آن‌ها شامل کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر و بهبود خواص خاک به روش طبیعی است. چالش‌های این روش شامل زمان‌بر بودن فرآیند و وابستگی به شرایط محیطی است (دیجونگ و همکاران ۲۰۱۰). **خاک‌ریزهای سبک (مانند استفاده از لاستیک فرسوده)**: این خاک‌ریزها در ساخت خاک‌ریز، دیوارهای حائل سبک و زه‌کشی کاربرد دارند. استفاده از لاستیک فرسوده به کاهش حجم پسماندهای لاستیکی و کاهش وزن کلی سازه کمک می‌کند. با این حال، نیاز به فرآوری خاص لاستیک‌ها و احتمال آزاد شدن

به کار می‌روند. مزیت عمده آن‌ها کاهش آلودگی محیط زیست پس از پایان عمر مفید و کاهش نیاز به دفن زباله است. با این حال، عمر مفید محدودتری نسبت به ژئوسنتتیک‌های پلیمری دارند و مقاومت مکانیکی آن‌ها در برخی موارد کمتر است (زیکاری و بیگنوزی ۲۰۱۹). به طور کلی، این بررسی نشان می‌دهد که صنعت ژئوتکنیک در حال حرکت به سمت راه حل‌های پایدارتر است که هم نیازهای مهندسی را برآورده می‌کنند و هم اثرات زیست محیطی را به حداقل می‌رسانند. انتخاب فناوری مناسب به عوامل متعددی از جمله شرایط خاص پروژه، ملاحظات هزینه و اولویت‌های زیست محیطی بستگی دارد.

مواد شیمیایی در صورت عدم کنترل صحیح از چالش‌ها محسوب می‌شود (سنادهیرا و همکاران ۲۰۱۷).

بتن‌های بازیافتی در فونداسیون: این بتن‌ها در بتن‌ریزی فونداسیون‌های کم‌اهمیت‌تر، لایه‌های زیرین روسازی و پر کردن گودال‌ها استفاده می‌شوند. مزایای زیست محیطی آن‌ها شامل کاهش مصرف سنگدانه طبیعی و کاهش پسماندهای ساختمانی است. اما ممکن است مقاومت فشاری کم‌تری نسبت به بتن معمولی داشته باشند و نگرانی‌هایی در مورد دوام بلندمدت آن‌ها وجود دارد. (تام و همکاران ۲۰۱۱).

ژئوسنتتیک‌های زیست تخریب پذیر: این مصالح برای کنترل فرسایش خاک، تقویت خاک در کاربردهای موقت و فیلتراسیون

جدول ۳- مقایسه انواع فناوری‌های جدید در حوزه فعالیت‌های ژئوتکنیکی

مزایا/فناوری	مزایای زیست محیطی	معایب/چالش‌ها	کاربرد در ژئوتکنیک	مرجع
خاک مسلح با الیاف بازیافتی	کاهش نیاز به مصالح جدید و کاهش پسماند ساختمانی، افزایش پایداری و مقاومت خاک.	ممکن است فرآیند بازیافت پیچیده و هزینه‌بر باشد، کنترل کیفیت الیاف بازیافتی ممکن است چالش برانگیز باشد.	افزایش استحکام و پایداری خاک در جاده‌ها، فرودگاه‌ها و سدها، بهبود زه‌کشی خاک و آب‌های زیرزمینی، کنترل فرسایش خاک.	میرزا بابایی و ارشد (۲۰۱۸)
شمع‌های کم‌کربن	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با تولید سیمان و فولاد، کاهش اثرات زیست محیطی حمل و نقل مصالح.	ممکن است نیاز به فناوری‌های خاص یا مواد افزودنی جدید داشته باشند، محدودیت در ظرفیت باربری برای برخی انواع، چالش‌های اجرایی در شرایط خاص خاک.	فونداسیون سازه‌ها، پایداری شیب‌ها، دیوارهای حائل.	هابرت و راسل (۲۰۰۹)
روش‌های بهسازی بیولوژیک (مانند MICP)	کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر، بهبود خواص خاک به روش طبیعی، پایداری طولانی‌مدت.	زمان‌بر بودن فرآیند، وابستگی به شرایط محیطی (دما، رطوبت)، کنترل دقیق فرآیند برای دستیابی به نتایج مطلوب، هزینه‌های اولیه بالاتر.	تثبیت خاک‌های مسئله‌دار مانند خاک‌های رمبند و واگرا، افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک، جلوگیری از روانگرایی خاک.	دیجونگ و همکاران (۲۰۱۰)
خاکریزهای سبک (مانند استفاده از لاستیک فرسوده)	کاهش حجم پسماندهای لاستیکی، کاهش وزن کلی سازه و فشار بر خاک زیرین، خواص عایق حرارتی و صوتی.	نیاز به فرآوری خاص لاستیک‌ها، احتمال آزاد شدن مواد شیمیایی در صورت عدم کنترل صحیح، مسائل مربوط به آتش‌سوزی (در صورت عدم رعایت استانداردهای ایمنی)، محدودیت در کاربرد در خاک‌های با رطوبت بالا.	ساخت خاکریز، دیوارهای حائل سبک، زه‌کشی، جذب ارتعاشات.	سنادهیرا و همکاران (۲۰۱۷)
بتن‌های بازیافتی در فونداسیون	کاهش مصرف سنگدانه طبیعی، کاهش پسماندهای ساختمانی، کاهش انرژی مصرفی در تولید.	مقاومت فشاری کمتر در مقایسه با بتن معمولی در برخی موارد، نگرانی در مورد دوام و عملکرد در بلندمدت، نیاز به فرآیند جداسازی و خردایش مصالح.	بتن‌ریزی فونداسیون‌های کم‌اهمیت‌تر، لایه‌های زیرین روسازی، پر کردن گودال‌ها، سازه‌های نگهدارنده موقت.	تام و همکاران (۲۰۱۱)
ژئوسنتتیک‌های زیست تخریب پذیر	کاهش آلودگی محیط زیست پس از پایان عمر مفید، کاهش نیاز به دفن زباله، بهبود خاک و حمایت از پوشش گیاهی.	عمر مفید محدودتر نسبت به ژئوسنتتیک‌های پلیمری، مقاومت مکانیکی کمتر در برخی موارد، هزینه تولید بالاتر.	کنترل فرسایش خاک، تقویت خاک در کاربردهای موقت، فیلتراسیون، زه‌کشی.	زیکاری و بیگنوزی (۲۰۱۹)

Cradle-to-Grave Analysis (LCA) (جهانی): این رویکرد، ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی یک محصول یا فرآیند را از مرحله استخراج مواد اولیه تا پایان عمر آن (شامل مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها و تولید پسماند) در بر می‌گیرد. این یک ابزار اساسی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی کارهای ژئوتکنیکی در طول چرخه عمر کامل پروژه (از بررسی سایت تا پایان عمر سازه) است (ریبترزو همکاران ۲۰۰۴).

ASTM E 1991 (آمریکا ASTM International): این استاندارد یک راهنمای استاندارد برای ارزیابی چرخه عمر زیست‌محیطی مصالح/محصولات ساختمانی ارائه می‌دهد. این استاندارد یک چارچوب و مجموعه اصول مشترک برای ارزیابی چرخه عمر مصالح و محصولات ساختمانی فراهم می‌کند که می‌تواند شامل مصالح مورد استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیک نیز باشد و به تعیین دامنه و رویکرد ارزیابی کمک می‌کند (ASTM 2019).

BREEAM (بریتانیا BRE): این روش ارزیابی پایداری پیشرو برای برنامه‌ریزی جامع، زیرساخت و ساختمان‌ها است. این شامل ارزیابی آلودگی زمین (POL09) و خطرات طبیعی (RSL03) است که مستقیماً با بررسی‌های ژئوتکنیکی و ارزیابی خاک مرتبط است و می‌تواند به پروژه‌های ژئوتکنیک در کسب امتیاز پایداری کمک کند (BRE 2021).

ILCD Handbook (اتحادیه اروپا): این راهنما، راهنمای جامعی برای انجام مطالعات ارزیابی چرخه عمر و توسعه داده‌های ارزیابی چرخه عمر با کیفیت بالا، با تمرکز بر شفافیت و سازگاری ارائه می‌دهد. این راهنما یک چارچوب دقیق برای جمع‌آوری و مدل‌سازی داده‌های چرخه عمر ارائه می‌دهد که برای انجام ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیک بسیار مفید است و به اطمینان از صحت و قابلیت مقایسه نتایج کمک می‌کند (اتحادیه اروپا ۲۰۱۰).

یکی دیگر از عواملی که بر ارزیابی چرخه عمر مصالح ساختمانی تأثیر دارد استانداردهایی است که در کشورها و مناطق مختلف اعمال می‌شود. از همین‌رو این استانداردها از منابع مختلف استخراج و یک تحلیل مقایسه‌ای ارائه گردید. در جدول ۴ این مقایسه آورده شده است. این جدول به مقایسه استانداردهای ارزیابی چرخه عمر در کشورهای مختلف می‌پردازد که می‌تواند برای پروژه‌های ژئوتکنیک کاربرد داشته باشد. در ادامه، توضیحات مربوط به شرح ذیل می‌باشد:

ISO 14040/14044 (جهانی): این استاندارد، یک چارچوب کلی برای انجام ارزیابی چرخه عمر ارائه می‌دهد. این استاندارد شامل تعریف هدف و دامنه، تحلیل موجودی، ارزیابی اثرات و تفسیر است. در پروژه‌های ژئوتکنیک، این استاندارد به‌عنوان یک چارچوب عمومی قابل استفاده است اما نیاز به تفسیر و بومی‌سازی برای کاربردهای خاص ژئوتکنیک دارد (فین ودن ۲۰۰۹).

EN 15804 (اروپا): این استاندارد بر قوانین اصلی دسته‌بندی محصول (PCR) برای اظهارنامه‌های زیست‌محیطی نوع III (EPD) برای محصولات و خدمات ساختمانی تمرکز دارد. این استاندارد به‌طور خاص در زمینه ارزیابی محصولات و مصالح ساختمانی مورد استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیک مانند ژئوسنتیک‌ها کاربرد دارد و برای تعیین انتشار کربن مرتبط با مصالح در این پروژه‌ها مفید است (ویرینجا ۲۰۱۹).

LEED V4.1 (آمریکا USGBC): این سیستم رتبه‌بندی ساختمان سبز برای طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری ساختمان‌های سبز توسعه یافته است. اگرچه به‌طور مستقیم برای ارزیابی پروژه‌های ژئوتکنیک توسعه نیافته است، اما اهداف پایداری آن مانند کاهش ردپای کربن، استفاده از مصالح بازیافتی و مدیریت آب، می‌تواند از طریق انتخاب مصالح و روش‌های پایدار در کارهای ژئوتکنیکی حمایت شود (شورای ساختمان سبز آمریکا ۲۰۲۱).

جدول ۴ - مقایسه انواع استانداردهای مختلف در حوزه ارزیابی چرخه عمر

استاندارد/ دستورالعمل	کشور/ سازمان	تمرکز اصلی	سازگاری با پروژه‌های ژئوتکنیک	مرجع
ISO 14040/14044	ISO جهانی	اصول و چارچوب ارزیابی چرخه عمر، شامل تعریف هدف و دامنه، تحلیل موجودی، ارزیابی اثرات و تفسیر.	به‌عنوان یک چارچوب کلی برای انجام ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیک قابل استفاده است. این استانداردها راهنمایی‌های کلی ارائه می‌دهند و نیاز به تفسیر و	فین ودن (۲۰۰۹)

2- American Society for Testing and Materials

3- BRE Environmental Assessment Method

4- International Reference Life Cycle Data System

بومی سازی برای کاربردهای خاص ژئوتکنیک دارند.				
EN 15804	اروپا	قوانین اصلی دسته بندی محصول (PCR) برای اظهارنامه های زیست محیطی نوع (EPD) III برای هر محصول و خدمات ساختمانی.	در زمینه ارزیابی محصولات و مصالح ساختمانی مورد استفاده در پروژه های ژئوتکنیک، مانند ژئوسنتتیک ها، کاربرد دارد. به طور خاص برای تعیین انتشار کربن مرتبط با مصالح در این پروژه ها مفید است.	ویرینجا (۲۰۱۹)
LEED v4.1	آمریکا (USGBC)	سیستم رتبه بندی ساختمان سبز برای طراحی، ساخت، بهره برداری و نگهداری ساختمان های سبز.	به طور مستقیم برای ارزیابی پروژه های ژئوتکنیک توسعه نیافته است، اما اهداف پایداری آن (مانند کاهش رد پای کربن، استفاده از مصالح بازیافتی، مدیریت آب) می تواند از طریق انتخاب مصالح و روش های پایدار در کارهای ژئوتکنیکی حمایت شود.	شورای ساختمان سبز آمریکا (۲۰۲۱)
LCA	جهانی	ارزیابی جامع اثرات زیست محیطی یک محصول یا فرآیند از مرحله استخراج مواد اولیه (گهواره) تا پایان عمر (گور)، شامل مصرف انرژی، انتشار آلاینده ها و تولید پسماند.	یک ابزار اساسی برای ارزیابی اثرات زیست محیطی کارهای ژئوتکنیکی در طول چرخه عمر کامل پروژه (از بررسی سایت تا پایان عمر سازه) است. این شامل تحلیل ورودی ها و خروجی های انرژی و مواد در هر مرحله است.	ریبتر (۲۰۰۴)
ASTM E1991	آمریکا ASTM	راهنمای استاندارد برای ارزیابی چرخه عمر زیست محیطی مصالح / محصولات ساختمانی.	این استاندارد یک چارچوب و مجموعه اصول مشترک برای ارزیابی چرخه عمر مصالح و محصولات ساختمانی ارائه می دهد که می تواند شامل مصالح مورد استفاده در پروژه های ژئوتکنیک نیز باشد. این استاندارد به تعیین دامنه و رویکرد ارزیابی کمک می کند.	ASTM
BREEAM	بریتانیا (BRE)	روش ارزیابی پایداری پیشرو برای برنامه ریزی جامع، زیرساخت و ساختمان ها، شامل ارزیابی آلودگی، انرژی، آب، مصالح و زمین.	شامل ارزیابی آلودگی زمین (POL09) و خطرات طبیعی (RSL03) است که مستقیماً با بررسی های ژئوتکنیکی و ارزیابی خاک مرتبط است و می تواند به پروژه های ژئوتکنیک در کسب امتیاز پایداری کمک کند.	BRE. (2021)
ILCD	اتحادیه اروپا European Commission	ارائه راهنمای جامع برای انجام مطالعات ارزیابی چرخه عمر و توسعه داده های ارزیابی چرخه عمر با کیفیت بالا، با تمرکز بر شفافیت و سازگاری.	این راهنما یک چارچوب دقیق برای جمع آوری و مدل سازی داده های چرخه عمر ارائه می دهد که برای انجام ارزیابی چرخه عمر در پروژه های ژئوتکنیک بسیار مفید است و به اطمینان از صحت و قابلیت مقایسه نتایج کمک می کند.	اتحادیه اروپا (۲۰۱۰)

به تفسیر و بومی سازی دارد. استاندارد EN 15804 نیز که بیش تر بر مصالح ساختمانی تمرکز دارد، برای ارزیابی انتشار کربن در مصالحی مانند ژئوسنتتیک ها مناسب است. در مقابل، استاندارد LEED v4.1 با تأکید بر کاهش رد پای کربن و استفاده از مصالح بازیافتی، اگرچه مستقیماً برای پروژه های ژئوتکنیکی طراحی نشده، اما می تواند به عنوان راهنمای کلی مورد استفاده قرار گیرد.

ارزیابی چرخه عمر به عنوان ابزاری اساسی برای سنجش پایداری در پروژه های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می گیرد. استانداردهای مختلفی در این زمینه وجود دارند که هر کدام با رویکردی خاص به ارزیابی اثرات زیست محیطی می پردازند. از جمله این استانداردها می توان به ISO 14040/14044 اشاره کرد که چارچوب کلی برای انجام ارزیابی چرخه عمر ارائه می دهد و برای پروژه های ژئوتکنیکی قابل استفاده است. البته این استاندارد نیاز

عدم وجود یک چارچوب یکپارچه و منسجم برای ارزیابی چرخه حیات عملیات ژئوتکنیکی در ساخت‌وساز است. این عدم انسجام شامل تعریف واحد عملکردی، انتخاب مرزهای سیستم، داده‌های موجودی مناسب و انتخاب دسته‌بندی‌های تأثیر محیط‌زیستی می‌شود. بررسی ادبیات موضوع در این تحقیق نشان داد ارزیابی‌های فعلی عمدتاً بر روی مصرف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی متمرکز هستند. در حالی که تأثیرات مرتبط با منابع خاک و زمین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این موضوع نیاز به توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی مرتبط با کیفیت خاک، عملکردهای خاک و خدمات اکوسیستمی آن را برجسته می‌کند. همچنین، نیاز به تطبیق روش‌های ارزیابی از مقیاس کلان به مقیاس پروژه‌های ژئوتکنیکی برای بهبود دقت تحلیل‌ها مطرح شده است. علاوه بر این، در برخی از فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی، چالش‌های خاصی وجود دارد:

– **خاک مسلح با الیاف بازیافتی:** فرآیند بازیافت ممکن است پیچیده و هزینه‌بر باشد و کنترل کیفیت الیاف بازیافتی می‌تواند چالش‌برانگیز باشد.

– **شمع‌های کم‌کربن:** این شمع‌ها ممکن است نیاز به فناوری‌های خاص یا مواد افزودنی جدید داشته باشند. همچنین، محدودیت‌هایی در ظرفیت باربری برای برخی انواع و چالش‌های اجرایی در شرایط خاص خاک وجود دارد.

– **روش‌های بهسازی بیولوژیک (مانند MICP):** این فرآیند زمان‌بر است و به شرایط محیطی (مانند دما و رطوبت) وابسته است. همچنین هزینه‌های اولیه بالاتری ممکن است داشته باشد. **خاکریزهای سبک (مانند استفاده از لاستیک فرسوده):** نیاز به فرآوری خاص لاستیک‌ها، احتمال آزاد شدن مواد شیمیایی در صورت عدم کنترل صحیح، و مسائل مربوط به آتش‌سوزی (در صورت عدم رعایت استانداردهای ایمنی) از چالش‌ها هستند. همچنین محدودیت‌هایی در کاربرد در خاک‌های با رطوبت بالا وجود دارد.

– **بتن‌های بازیافتی در فونداسیون:** این بتن‌ها ممکن است مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با بتن معمولی در برخی موارد داشته باشند. همچنین نگرانی‌هایی در مورد دوام و عملکرد در بلندمدت، و نیاز به فرآیند جداسازی و خردایش مصالح وجود دارد.

– **ژئوسنتتیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر:** این مصالح عمر مفید محدودتری نسبت به ژئوسنتتیک‌های پلیمری دارند و مقاومت مکانیکی آن‌ها در برخی موارد کمتر است. هزینه تولید آن‌ها نیز ممکن است بالاتر باشد.

استاندارد BREEAM نیز با تمرکز بر ارزیابی آلودگی زمین و خطرات طبیعی، ارتباط مستقیمی با بررسی‌های ژئوتکنیکی دارد. با وجود تنوع استانداردهای موجود، چالش‌های متعددی در زمینه ارزیابی چرخه عمر پروژه‌های ژئوتکنیکی وجود دارد. یکی از اصلی‌ترین مشکلات، نبود یک چارچوب یکپارچه و اختصاصی برای این نوع پروژه‌هاست که باعث شده ارزیابی‌ها از انسجام لازم برخوردار نباشند. علاوه بر این، بیشتر ارزیابی‌های کنونی بر مصرف انرژی و گرمایش جهانی متمرکز هستند و تأثیرات مرتبط با خاک و زمین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. کمبود داده‌های دقیق و قابل اعتماد نیز از دیگر چالش‌هاست که دقت ارزیابی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر، فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی مانند خاک‌های مسلح با الیاف بازیافتی یا روش‌های بهسازی بیولوژیک، با محدودیت‌هایی مانند هزینه‌های بالا و چالش‌های اجرایی مواجه هستند که کاربرد گسترده آن‌ها را دشوار می‌سازد. برای رفع این چالش‌ها، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است. توسعه استانداردهای اختصاصی برای فعالیت‌های ژئوتکنیکی، از جمله تعریف واحدهای عملکردی یکپارچه و مشخص کردن مرزهای سیستم، می‌تواند به بهبود ارزیابی‌ها کمک کند. هماهنگی این استانداردها با چارچوب‌های بین‌المللی مانند ISO 14040/14044 نیز ضروری است تا قابلیت مقایسه و پذیرش جهانی آن‌ها تضمین شود. از سوی دیگر، ایجاد پایگاه‌های داده جامع و توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی جدید برای ارزیابی تأثیرات بر خاک و خدمات اکوسیستمی، می‌تواند دقت تحلیل‌ها را افزایش دهد. سرمایه‌گذاری در تحقیقات کاربردی و انجام مطالعات موردی نیز برای غلبه بر محدودیت‌های فناوری‌های نوین و کاهش هزینه‌های آن‌ها ضروری است. علاوه بر این، آموزش متخصصان و ترویج همکاری بین صنعت، دانشگاه و دولت می‌تواند به تسریع توسعه و اجرای چارچوب‌های یکپارچه کمک کند. با اجرای این راهکارها می‌توان به ایجاد یک سیستم ارزیابی چرخه عمر منسجم و کارآمد برای پروژه‌های ژئوتکنیکی دست یافت. چنین سیستمی نه تنها دقت و قابلیت اطمینان ارزیابی‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه زمینه را برای تصمیم‌گیری‌های پایدار در صنعت ساخت‌وساز فراهم می‌کند. حرکت به سمت استانداردهای اختصاصی و یکپارچه، همراه با توسعه فناوری‌های پایدار و آموزش ذینفعان، می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های ژئوتکنیکی و دستیابی به اهداف پایداری ایفا کند. با وجود مزایای فراوان ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیکی، چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز در به‌کارگیری آن وجود دارد که باید مد نظر قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها،

به‌طور کلی، چالش‌های اصلی در کاربرد ارزیابی چرخه عمر در ژئوتکنیک شامل کمبود داده‌های دقیق و قابل اعتماد، پیچیدگی مدل‌سازی فرآیندهای ژئوتکنیکی و نیاز به توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی خاص برای این حوزه است. حل این چالش‌ها می‌تواند به بهبود دقت ارزیابی‌ها و ترویج تصمیم‌گیری‌های پایدارتر در صنعت ساخت‌وساز کمک شایانی کند.

برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌های ژئوتکنیکی در صنعت ساخت‌وساز، راهکارهای متعددی وجود دارد که با بهره‌گیری از ارزیابی چرخه عمر می‌توانند به بهبود پایداری پروژه‌ها کمک کنند. این راهکارها شامل انتخاب مصالح پایدار، بهینه‌سازی روش‌های اجرایی و مدیریت پسماندها در تمامی مراحل چرخه عمر پروژه هستند.

۱- انتخاب مصالح پایدار و نوآورانه

استفاده از مصالح با ردپای کربن کمتر و یا مصالح بازیافتی، یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش اثرات زیست‌محیطی در پروژه‌های ژئوتکنیکی است:

سیمان‌های با کربن کم^۶ و مواد مکمل سیمانی (SCMs): تحقیقات اخیر همچنان بر پتانسیل بالای SCMs مانند GGBS و خاکستر بادی در کاهش انتشار کربن تأکید دارند. مطالعات نشان می‌دهند که جایگزینی بخشی از کلینکر سیمان با این مواد می‌تواند منجر به کاهش انتشار CO₂ در محدوده ۳۰٪ تا ۷۰٪ یا حتی بیشتر شود. بسته به نسبت جایگزینی و نوع SCM (مسلم و ونگ ۲۰۲۱) این ارقام نشان‌دهنده تعهد صنعت به سمت سیمان‌های پایدارتر است. استفاده از افزودنی‌های جدیدتر و فعال‌کننده‌های قلیایی که سیمان را به‌طور کامل جایگزین می‌کنند، می‌تواند کاهش انتشار CO₂ را تا ۸۰٪ نسبت به بتن‌های سنتی سیمان پورتلند به همراه داشته باشد. این مواد پتانسیل زیادی در کاربردهای ژئوتکنیکی مانند شمع‌ها و ستون‌های بهسازی خاک دارند (پرویس ۲۰۱۸).

مصالح بازیافتی در تثبیت خاک و زیرسازی‌ها: استفاده از بتن بازیافتی (RCA) و سایر مصالح بازیافتی ساخت‌وساز (مانند آجر خرد شده یا شیشه خرد شده) به‌عنوان پرکننده یا در لایه‌های زیرسازی جاده‌ها و فونداسیون‌ها، تأثیرات زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که جایگزینی مصالح طبیعی با RCA می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی اولیه در حدود ۱۵٪ تا ۴۰٪ و کاهش انتشار CO₂ در حدود ۱۰٪ تا ۲۵٪ شود. این کاهش‌ها ناشی از صرفه‌جویی در استخراج، فرآوری و حمل و نقل مصالح بکر است (ژینگ و تام ۲۰۲۲).

۲- بهینه‌سازی روش‌های اجرایی

بهبود کارایی فرآیندهای اجرایی و استفاده از فناوری‌های نوین، نقش مهمی در کاهش ردپای زیست‌محیطی فعالیت‌های ژئوتکنیکی ایفا می‌کند:

بهره‌وری انرژی ماشین‌آلات و تجهیزات: استفاده از ماشین‌آلات نسل جدید با بهره‌وری سوخت بالاتر، به‌کارگیری سوخت‌های زیستی یا هیبریدی/برقی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات در محل پروژه می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت ۱۵٪ تا ۳۰٪ و به تبع آن کاهش انتشار CO₂ شود. این امر مستقیماً به کاهش انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای از سایت پروژه کمک می‌کند (کارلسون ۲۰۲۲).

روش‌های نوین بهسازی زمین: توسعه روش‌های بهسازی زمین با مصرف انرژی کمتر، مانند روش‌های بیولوژیکی که از فعالیت میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌کنند، می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از روش‌های سنتی (مانند تزریق سیمان یا استفاده از انرژی زیاد) را کاهش دهد. اگرچه درصد دقیق کاهش انرژی و CO₂ به ماهیت پروژه بستگی دارد، اما این روش‌ها به‌طور کلی پتانسیل کاهش مصرف انرژی و مواد را تا ۵۰٪ در مقایسه با روش‌های شیمیایی یا مکانیکی سنتی دارند (مارتینز و دیجونک ۲۰۲۲).

۳- مدیریت پسماند

مدیریت کارآمد پسماندهای ساخت‌وساز، علاوه بر کاهش حجم پسماند دفن شده، می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در منابع و انرژی شود.

بازیافت و استفاده مجدد از نخاله‌های ساختمانی: با توسعه فناوری‌های بازیافت و سیاست‌های حمایتی، نرخ بازیافت نخاله‌های ساختمانی در بسیاری از مناطق به‌طور فزاینده‌ای بالا رفته است. برخی مطالعات نشان می‌دهند که با اجرای سیاست‌های صحیح، بیش از ۸۰٪ تا ۹۰٪ از این نخاله‌ها را می‌تواند بازیافت یا استفاده مجدد شود (منگ و همکاران ۲۰۱۸). این امر منجر به کاهش قابل توجه در نیاز به دفن پسماند و کاهش انتشار CO₂ ناشی از تولید مصالح بکر می‌شود.

اقتصاد چرخشی در ژئوتکنیک: پیاده‌سازی اصول اقتصاد چرخشی که بر کاهش تولید پسماند، استفاده مجدد و بازیافت حداکثری مواد تأکید دارد، می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی را در طول چرخه عمر پروژه کاهش دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های اقتصادی جهان، سهم قابل‌توجهی در مصرف منابع، انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای دارد. فعالیت‌های ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی زمین و احداث پی‌ها به‌دلیل مصرف بالای انرژی و مواد، نقش کلیدی در تأثیرات زیست‌محیطی این صنعت ایفا می‌کنند. این مطالعه مروری نشان می‌دهد که ارزیابی چرخه عمر به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل این تأثیرات در تمام مراحل عمر پروژه‌های ساختمانی شناخته شده است. با این حال، علیرغم مزایای متعدد، چالش‌های اساسی در به‌کارگیری ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیکی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به نبود چارچوب یکپارچه و اختصاصی، کمبود داده‌های دقیق و قابل اعتماد، و تمرکز بیش از حد بر شاخص‌های سنتی مانند مصرف انرژی و گرمایش جهانی اشاره کرد. این در حالی است که تأثیرات مرتبط با خاک و خدمات اکوسیستمی آن کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی مانند خاک‌های مسلح با الیاف بازیافتی، شمع‌های کم‌کربن، روش‌های بهسازی بیولوژیک و استفاده از مصالح بازیافتی، پتانسیل بالایی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی دارند. برای مثال، این فناوری‌ها می‌توانند تا ۴۰ درصد از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای بکاهند. با این وجود، موانعی مانند هزینه‌های اولیه بالا، محدودیت‌های فنی، وابستگی به شرایط محیطی و چالش‌های اجرایی، گسترش آن‌ها را با دشواری مواجه کرده است. همچنین، استانداردهای بین‌المللی

موجود مانند ISO 14040/14044، EN 15804 و LEED v4.1 اگرچه چارچوب‌های مفیدی ارائه می‌دهند، اما نیاز به بومی‌سازی و توسعه شاخص‌های اختصاصی برای فعالیت‌های ژئوتکنیکی دارند. برای رفع این چالش‌ها، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است. توسعه استانداردهای اختصاصی برای ارزیابی چرخه عمر فعالیت‌های ژئوتکنیکی، ایجاد پایگاه‌های داده جامع و دقیق، و توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی جدید برای ارزیابی تأثیرات بر خاک و خدمات اکوسیستمی از جمله این راهکارها هستند. علاوه بر این، سرمایه‌گذاری در تحقیقات کاربردی، انجام مطالعات موردی و پروژه‌های پایلوت، و استفاده از ابزارهای مدل‌سازی پیشرفته می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان ارزیابی‌ها کمک کند. از سوی دیگر، آموزش متخصصان، ترویج همکاری بین صنعت، دانشگاه و دولت، و وضع سیاست‌های تشویقی برای پروژه‌های پایدار نیز نقش کلیدی در تسریع این روند ایفا می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که حرکت به سمت استانداردهای یکپارچه و اختصاصی، همراه با توسعه فناوری‌های پایدار و آموزش ذینفعان، می‌تواند صنعت ساخت‌وساز را به سمت پایداری بیشتر سوق دهد. با اجرای این راهکارها، نه تنها دقت و قابلیت اطمینان ارزیابی‌های چرخه عمر بهبود می‌یابد، بلکه زمینه برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و پایدار در پروژه‌های ژئوتکنیکی فراهم می‌شود. این امر به کاهش اثرات زیست‌محیطی، حفظ منابع طبیعی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک شایانی خواهد کرد.

References

- World Bank. (n.d.). Industry (including construction), value added (% of GDP). World Bank Data. Retrieved June 4, 2025, from <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS>
- Hertwich, E. G., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N., & Fishman, T. (2021). Resource efficiency and climate change mitigation: Material efficiency strategies for buildings and cars. *Environmental Science & Policy*, 124, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.014>
- Global Growth Insights. (2023). Construction materials market – Global industry analysis and forecast (2023–2030). Retrieved June 4, 2025, from <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/construction-materials-market-107429>
- Häkkinen, T., & Vares, S. (2020). Life Cycle Assessment of Geotechnical Works in Building Construction: A Review. *Sustainability*, 12(20), 8442. <https://doi.org/10.3390/su12208442>
- Song, X., Carlsson, C., Kiilgaard, R., Bendz, D., & Kennedy, H. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: A review and recommendations. *Sustainability*, 12(20), 8442.
- de Melo, D. L., Kendall, A., & DeJong, J. T. (2024). Evaluation of life cycle assessment (LCA) use in geotechnical engineering. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(1), 012001.
- Pettinaroli, A., Susani, S., Castellanza, R., Collina, E., Pierani, M., Paoli, R., & Romagnoli, F. (2023). A Sustainability-Based Approach for Geotechnical Infrastructure. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 738-752.
- Song, J., Kim, J., & Lee, S. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: A review and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121345>
- Raymond, M., Korre, A., & Durucan, S. (2020). Sustainability assessment of geotechnical systems: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 76–93. <https://doi.org/10.1111/jiec.12946>
- Kilgaard, A., Birgisdóttir, H., & Hauschild, M. Z. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: Harmonization challenges and future directions. *Sustainability*, 12(20), 8442. <https://doi.org/10.3390/su12208442>
- Samuelsson, J. (2023). Development of life cycle based methodology for geotechnical design. Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology. Retrieved from <https://trid.trb.org/View/2344758>
- AzariJafari, H., Yahia, A., & Amor, B. (2016). Life cycle assessment of pavements: Reviewing research challenges and opportunities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.004>
- Du, G., Safi, M., & Pettersson, L. (2014). Life cycle assessment of a reinforced concrete bridge: Implementation in SimaPro. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 821–830. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0684-x>
- Huang, B., Wang, L., & Li, G. (2018). Sustainable ground improvement using industrial by-products: An LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 189, 262–273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.099>
- AzariJafari, H., Carrusca, K., DeRousseau, M., Ellingboe, E., Farny, J., Gasi, G., ... & Walloch, C. Members of Carbonation Working Group.
- Mirzababaei, M., & Arshad, A. (2018). Mechanical properties of fiber-reinforced recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 178, 118-128.
- Habert, G., & Roussel, N. (2009). Early age hydration of low-carbon cements. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1147-1158.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210.
- Senadheera, S. P. A., & Seneviratne, A. M. (2017). Geotechnical properties of tyre derived aggregate (TDA) mixed with sand. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup2), 170-184.
- Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2011). A review on the sustainability of construction waste recycling. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), 1775-1780.
- Zicari, S., & Bignozzi, M. C. (2019). Biodegradable geogrids for soil reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(1), 84-93.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J. B., Heijungs, R., Hellweg, S., ... & Suh, S. (2009). Recent developments in LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 21-36.
- Wieringa, D., & Schipper, H. R. (2019). The new European Standard EN 15804+ A2 for Environmental Product Declarations of Construction Products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(7), 1335-1344.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Inaba, T., Berg, K. I., ... & Rydh, C. J. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory

- analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720.
25. American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM E1991 - 18 Standard Guide for Environmental Life Cycle Assessment in the Building Construction Industry .
26. BRE. (2021). BREEAM International New Construction 2016 - Technical Manual .
27. European Commission, Joint Research Centre. (2010). ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Publications Office of the European Union.
28. Taylor, M. (2024, February 23). Why a circular built environment makes economic, environmental sense. Reuters. Retrieved June 4, 2025, from <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/comment-why-circular-built-environment-makes-economic-environmental-sense-2024-02-23/>
29. U.S. Green Building Council. (2021). LEED v4.1 Building Design and Construction Reference Guide .
30. Muslim, F., Wong, H. S., Choo, T. H., & Buenfeld, N. R. (2021). Influence of supplementary cementitious materials on microstructure and transport properties of spacer-concrete interface. *Cement and Concrete Research*, 149, 106561.
31. Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and concrete research*, 114, 40-48.
32. Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Hao, J. L., & Wang, J. (2022). Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. *Construction and Building Materials*, 317, 125950.
33. Karlsson, I., Rootzén, J., & Johnsson, F. (2020). Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains—Analysis of a Swedish road construction project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109651.
34. Martinez, A., Dejong, J., Akin, I., Aleali, A., Arson, C., Atkinson, J., ... & Zheng, J. (2022). Bio-inspired geotechnical engineering: principles, current work, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 72(8), 687-705.
35. Meng, Y., Ling, T. C., & Mo, K. H. (2018). Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 298-312.



Life cycle assessment of geotechnical works in building construction considering environmental considerations

Mohammad Bahrami Kia
Mohammad Amir Sherafati*

Master of Science in Civil Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Shiraz

Received: 04 April 2025

Accepted: 31 May 2025

Keywords: Life cycle assessment, geotechnical works, sustainable construction, environmental impacts

Extended Abstract

Introduction: The construction industry, as one of the largest economic sectors in the world, has a significant contribution to resource consumption, energy, and greenhouse gas emissions. Geotechnical activities such as excavation, land improvement, and foundation construction play a key role in the environmental impacts of this industry due to their high energy and material consumption. Life Cycle Assessment (LCA) is recognized as an efficient tool for analyzing these impacts at all stages of the life cycle of construction projects. This review article aims to investigate the application of LCA in geotechnical activities, identify sustainable technologies (such as recycled materials and low-carbon methods), and analyze the challenges in this field.

Materials and Methods: This study, using a systematic review method, reviewed valid articles (2010-2025) from scientific databases with relevant keywords. After screening based on quality and relevance criteria, data related to assessment methods, environmental indicators and new technologies were extracted. Qualitative analysis included comparative comparison of findings, identification of challenges and presentation of solutions and the results were presented in the form of comparative tables.

Results and Discussion: The results of this review study show that geotechnical activities (excavation, land improvement and foundation) have a significant contribution to energy consumption (150 to 1800 MJ/t) and carbon emissions (10 to 250 kg/t). The review of new technologies such as recycled fiber reinforced soils, low-carbon piles and biological remediation methods shows significant environmental benefits, but they face challenges such as high initial costs and technical limitations. Analysis of international standards indicates the lack of a unified framework for life cycle assessment of geotechnical activities. The findings highlight the need to develop specific indicators for soil quality and ecosystem services, as well as to create more accurate databases. The study suggests practical solutions such as optimizing construction methods, waste management, and the use of sustainable materials to reduce environmental impacts.

Conclusion: This review shows that geotechnical activities play a decisive role in the environmental sustainability of construction projects. The findings indicate that innovative approaches such as the use of recycled materials and low-carbon methods can reduce energy consumption and greenhouse gas emissions by up to 40%. However, there are significant barriers, including the lack of integrated assessment frameworks, a lack of reliable data, and high implementation costs. As a solution, it is proposed developing specific standards for life cycle assessment of geotechnical activities. These measures can guide the construction industry towards achieving sustainable development goals.

Corresponding author: Mohammad Amir Sherafati

Address: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Shiraz. **Tel:** +989173870014

Email: MA.Sherafati@iau.ac.ir

Citation: Sherafati M A, Bahrami Kia M. Life cycle assessment of geotechnical works in building construction considering environmental considerations. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 3(9): 39-51.



© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.



تحلیل آزمایشگاهی دوام و رفتار مکانیکی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در محیط های سولفاتی

با رویکرد کاهش مصرف سیمان و حفاظت از محیط زیست

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران

کرار عبدالامیر ناهی

استادیار گروه عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران

محمد امیر شرافتی*

کارشناس ارشد عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران

هادی فاطمی

چکیده مبسوط

مقدمه: در سال های اخیر، صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از بزرگ ترین مصرف کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه ای شناخته شده است. یکی از مهم ترین مصالح مورد استفاده در این صنعت، سیمان پرتلند است که تولید آن نیازمند مصرف قابل توجهی از انرژی بوده و گاز دی اکسید کربن (CO_2) یکی از اصلی ترین گازهای گلخانه ای را به جو آزاد می کند. این مسئله نه تنها کیفیت هوا و سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می دهد، بلکه باعث تشدید گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی نیز می شود. علاوه بر این، تولید سیمان به شدت به مواد اولیه ای مانند سنگ آهک و خاک رس وابسته است و استخراج بی رویه این مواد منجر به کاهش منابع طبیعی غیرقابل تجدید و تهدید پایداری زیست محیطی می شود.

مواد و روش ها: هدف پژوهش بررسی تأثیر جایگزینی جزئی سیمان با متاکائولن در بتن خودتراکم (SCC) و ارزیابی عملکرد این بتن در محیط های خورنده غنی از یون سولفات بود. برای این منظور، نمونه های بتن خودتراکم با سه سطح جایگزینی متاکائولن (۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ وزنی سیمان) تهیه شدند. به منظور شبیه سازی شرایط خورنده محیطی، نمونه ها در معرض چهار محلول سولفات مختلف قرار گرفتند که حاوی یون های سولفات حاصل از سولفات سدیم (Na_2SO_4)، سولفات منیزیم ($MgSO_4$)، سولفات کلسیم ($CaSO_4$) و سولفات آمونیوم ($(NH_4)_2SO_4$) بودند. این یون ها به دلیل اثرات مخرب شان بر سازه های بتنی، به ویژه در محیط های صنعتی و دریایی انتخاب تا مقاومت بتن تحت شرایط واقعی تر ارزیابی شود.

نتایج و بحث: نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از متاکائولن تأثیر مثبتی بر ویژگی های بتن خودتراکم دارد. در میان نمونه های مورد بررسی، مخلوط حاوی ۱۵٪ متاکائولن بهترین عملکرد را نشان داد. این مخلوط افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد (فاقد متاکائولن) داشت. همچنین جذب آب کاهش یافت که نشان دهنده کاهش تخلخل و افزایش تراکم ریزساختار بتن است. تصاویر SEM پیوستگی بیشتر و خلل و فرج کمتر را در ساختار داخلی بتن تأیید کردند. بتن حاوی ۱۵٪ متاکائولن همچنین مقاومت بیشتری در برابر محیط های سولفاتی، به ویژه در برابر یون های منیزیم و آمونیوم، از خود نشان داد و خرابی سطحی و ترک خوردگی کمتری مشاهده شد. علاوه بر این، جایگزینی جزئی سیمان با متاکائولن باعث کاهش انتشار CO_2 در فرآیند تولید بتن گردید که نقش مؤثری در کاهش تأثیرات زیست محیطی این ماده پرمصرف ساختمانی دارد. آزمایش های مقاومت فشاری در سنین مختلف نشان داد که مخلوط ۱۵٪ متاکائولن نه تنها در سن ۲۸ روزه، بلکه در سنین زود هنگام (۷ روز) و بلندمدت (۹۰ روز) عملکرد بهتری دارد که بیانگر واکنش پذیری پوزولانی مطلوب و توسعه مناسب ریزساختار در بلندمدت است. کاهش جذب آب نیز نشان دهنده نفوذپذیری کم تر به یون های مهاجم و در نتیجه کاهش تخریب در طول زمان می باشد. تحلیل تنش-کرنش نشان داد که نمونه های حاوی متاکائولن دارای سختی (مدول الاستیسیته) بالاتری هستند که نشان دهنده مقاومت بیشتر بتن در برابر تغییر شکل های ناگهانی تحت بارهای متناوب است.

نتیجه گیری: بر اساس نتایج به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که استفاده بهینه از ۱۵٪ متاکائولن نه تنها خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم را در برابر حمله یون های سولفات بهبود می بخشد، بلکه نقش مهمی در کاهش آلودگی زیست محیطی از طریق کاهش مصرف سیمان ایفا می کند. استفاده از متاکائولن با رویکردهای توسعه پایدار همسو بوده و می تواند عمر مفید سازه ها را در شرایط محیطی سخت افزایش دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲

واژه های کلیدی: بتن

خودتراکم - متاکائولن - دوام

بتن - کاهش انتشار - CO_2

توسعه پایدار - خوردگی

سولفات

نویسنده مسئول: محمد امیر شرافتی

نشانی: استادیار گروه عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران. تلفن: ۰۹۱۷۳۸۷۰۰۱۴. پست الکترونیکی: MA.Sherafati@iau.ac.ir

استاد: عبدالامیر ناهی کرار، شرافتی محمد امیر، فاطمی هادی. تحلیل آزمایشگاهی دوام و رفتار مکانیکی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در محیط های سولفاتی با رویکرد کاهش مصرف سیمان و حفاظت از محیط زیست. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۴؛ (۹): ۷۲-۵۲.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

ترکیب می‌تواند کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت فشاری و بهبود رفتار تنش-کرنش بتن را در پی داشته باشد. بتن خودمتراکم نوعی بتن با قابلیت جریان‌پذیری بالا است که بدون نیاز به لرزاننده‌های مکانیکی، قالب را پر کرده و متراکم می‌شود. این بتن دارای خواص رئولوژیکی ویژه‌ای است که از جمله آن‌ها می‌توان به گرانروی مناسب، قابلیت عبور از موانع و حفظ همگنی در طول اجرا اشاره کرد. از مهم‌ترین مزایای بتن خودمتراکم می‌توان به افزایش کیفیت سطحی، کاهش نیروی انسانی، بهبود دوام و کاهش نفوذپذیری اشاره کرد. این بتن در پروژه‌های با تراکم زیاد آرماتور، سازه‌های زیرزمینی و پروژه‌های زیرآبی کاربرد گسترده‌ای دارد. متاکائولن یک نوع پوزولان فعال است که از کلسینه کردن کائولن در دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. این ماده به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان در بتن استفاده می‌شود و تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی، دوام و رئولوژی بتن دارد. یکی از چالش‌های مهم در دوام بتن، حملات سولفاتی است. سولفات‌ها به‌طور طبیعی در خاک، آب‌های زیرزمینی، فاضلاب صنعتی و برخی محیط‌های دریایی وجود دارند. تماس مداوم بتن با این ترکیبات می‌تواند موجب تخریب ساختار آن و کاهش مقاومت مکانیکی شود (احمدی و همکاران ۱۳۹۶، ۱۴۰۱).

فرضیات تحقیق:

- افزودن میزان بهینه پوزولان طبیعی (متاکائولن) به بتن خودمتراکم، باعث کاهش نفوذ یون کلر و میزان جذب آن در بتن می‌شود.
- افزودن متاکائولن در درصد بهینه، مقاومت بتن خودمتراکم را در محیط سولفات افزایش می‌دهد.
- بهبود مقاومت و دوام بتن خودمتراکم با افزودن درصد بهینه متاکائولن در محیط‌های خورنده سولفاتی حاصل می‌شود.
- میزان تنش و کرنش بتن خودمتراکم با افزودن متاکائولن بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند.

اهداف تحقیق:

- تعیین درصد بهینه جایگزینی متاکائولن طبیعی در بتن خودمتراکم جهت دستیابی به حداکثر مقاومت مکانیکی و دوام در برابر محیط‌های سولفاتی.
- بررسی تأثیر جایگزینی متاکائولن بر کاهش نفوذپذیری و جذب یون‌های کلر در بتن خودمتراکم.

افزایش مصرف مصالح ساختمانی سنتی، به‌ویژه سیمان پرتلند، در دهه‌های اخیر منجر به تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات منفی زیست‌محیطی شده است (ژانگ و همکاران ۲۰۲۴). طبق گزارش IPCC^۱ (هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم)، حدود ۷ تا ۸ درصد از کل انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن به صنعت سیمان اختصاص دارد. از منظر زیست‌محیطی، کاهش مصرف سیمان به واسطه جایگزینی آن با متاکائولن، منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه CO₂ و کاهش استخراج منابع غیرتجدیدپذیر می‌شود. این راهکار در راستای اصول توسعه پایدار، به‌ویژه هدف شماره ۹ (زیرساخت‌های مقاوم و پایدار)، هدف شماره ۱۱ (شهرها و جوامع پایدار) و هدف شماره ۱۳ (مقابله با تغییرات اقلیمی) از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد قرار دارد (بخشی و همکاران ۲۰۲۱). علاوه بر این، کاهش عمر سازه‌های بتنی در اثر تأثیرات منفی یون‌های سولفات، موجب تشدید این روند می‌گردد. با توجه به نقش کلیدی صنعت ساخت‌وساز در آلودگی زیست‌محیطی، توسعه مصالح پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست به‌عنوان یک ضرورت جهانی مطرح شده است. یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی بتن، استفاده از مواد پوزولانی جایگزین سیمان است. در این میان، متاکائولن به‌عنوان یک پوزولان فعال، با ساختار ریزدانه و واکنش‌پذیری بالا، قابلیت بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن را داراست. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از سیمان با متاکائولن می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید CO₂ و ارتقاء ریزساختار بتن شود (رمضانیان‌پور و همکاران ۱۳۹۳). این ویژگی‌ها باعث شده است متاکائولن به‌عنوان یک گزینه مطلوب در تولید بتن پایدار و کم‌کربن شناخته شود. بتن خودتراکم (SCC) نیز به‌دلیل روانی بالا و عدم نیاز به ویریه، علاوه بر کاهش آلودگی صوتی و مصرف انرژی، در افزایش کیفیت ساخت‌وساز نقش مهمی ایفا می‌کند. با این حال، دوام این نوع بتن در محیط‌های مهاجم، به‌ویژه در برابر حملات سولفاتی، یک نگرانی اساسی به‌شمار می‌رود. یون‌های سولفاتی با ترکیبات هیدراته شده سیمان واکنش داده و منجر به تشکیل فازهای مخربی نظیر اترینگایت و ژپیس می‌شوند که در نهایت باعث ترک‌خوردگی، افزایش تخلخل و کاهش عمر مفید سازه می‌گردند (نادری و همکاران ۱۴۰۱). تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از متاکائولن در بتن خودتراکم می‌تواند مقاومت بتن در برابر حملات سولفاتی را به‌طور معناداری افزایش دهد، به‌ویژه هنگامی که درصد بهینه‌ای از جایگزینی لحاظ شود. هم‌چنین، این

تحلیل رفتار تنش-کرنش بتن خودمتراکم حاوی متاکائولن در شرایط حمله سولفاتی. ارزیابی نقش متاکائولن در بهبود ریزساختار و افزایش طول عمر بتن خودمتراکم با رویکردی محیط‌زیستی و توسعه پایدار.

مواد و روش‌ها

غلظت ۵ درصد قراردادده شد (شکل ۲). آزمایشات در سه بازه زمانی ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه انجام پذیرفت و نتایج استخراج گردید. پس از این مرحله جهت بررسی ریز ساختار از میکروسکوپ الکترونی استفاده می‌شود. در جدول ۱، لیست نمونه‌های بتن خودمتراکم ساخته شده با چهار درصد مختلف متاکائولن (۰٪، ۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪) در چهار محیط سولفاتی مختلف (سولفات سدیم، سولفات منیزیم، سولفات کلسیم و سولفات آمونیوم) ارائه شده است. کد نمونه شامل پیشوند "SC" به همراه درصد متاکائولن و محیط سولفاتی S1 تا S4 است.

در این تحقیق بررسی منحنی تنش و کرنش و بهبود دوام بتن خودمتراکم آزمایشگاهی حاوی پوزولان طبیعی متاکائولن در محیط‌های سولفاتی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا طرح اختلاط بتن خود متراکم تهیه گردید. متاکائولن با درصدهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد وزنی جایگزین سیمان مصرفی جهت ساخت بتن خودمتراکم استفاده گردید. در هر مرحله خواص بتن تازه مورد بررسی قرار گرفته شد. جهت آزمایش تنش و کرنش از نمونه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر، جهت آزمایش تست یون کلر تسریع شده از استوانه ۲۰×۱۰ سانتی‌متر و جهت تست جذب آب از نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ استفاده گردید (شکل ۱). پس از ساخت نمونه‌ها در چهار مخزن با محلول‌های مختلف سولفات با



شکل ۱- نمونه‌ها قبل از قرار گرفتن در محلول سولفات



شکل ۲- نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در محلول سولفات

جدول ۱- معرفی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی درصد‌های مختلف متاکائولن در چهار محیط سولفاتی

توضیحات	محیط سولفاتی	درصد متاکائولن (بر حسب درصد سیمان)	کد نمونه
نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات سدیم	سولفات سدیم	٪۰	SC-01-c1
نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات منیزیم	سولفات منیزیم	٪۰	SC-01-m2
نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات کلسیم	سولفات کلسیم	٪۰	SC-01-k3
نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم	سولفات آمونیوم	٪۰	SC-01-a4
مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات سدیم	سولفات سدیم	٪۵	SC-02-c1
مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات منیزیم	سولفات منیزیم	٪۵	SC-02-m2
مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات کلسیم	سولفات کلسیم	٪۵	SC-02-k3
مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم	سولفات آمونیوم	٪۵	SC-02-a4
مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات سدیم	سولفات سدیم	٪۱۵	SC-03-c1
مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات منیزیم	سولفات منیزیم	٪۱۵	SC-03-m2
مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات کلسیم	سولفات کلسیم	٪۱۵	SC-03-k3
مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم	سولفات آمونیوم	٪۱۵	SC-03-a4
مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات سدیم	سولفات سدیم	٪۲۵	SC-04-c1
مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات منیزیم	سولفات منیزیم	٪۲۵	SC-04-m2
مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات کلسیم	سولفات کلسیم	٪۲۵	SC-04-k3
مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم	سولفات آمونیوم	٪۲۵	SC-04-a4

آزمایش مقاومت فشاری و میزان تنش و کرنش

آزمایش مقاومت فشاری بتن یکی از مهم‌ترین آزمایشات در ارزیابی کیفیت بتن است. در این آزمایش نمونه‌های بتن به شکل مکعب یا استوانه‌ای ساخته شدند. پس از ریختن بتن در قالب‌ها، نمونه‌ها باید به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شوند. سپس، نمونه‌ها برای عمل‌آوری به مدت ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روز در محلول ۵ درصد سولفات متفاوت نگهداری گردیدند. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، نمونه‌های بتن در دستگاه فشار قرار می‌گیرند. دستگاه فشار نیروی فشاری را به‌طور یکنواخت و با سرعت مشخص به نمونه بتن وارد می‌کند. و پس از شکست نمونه‌ها میزان نهایی نیرو و میزان تغییر طول مشخص گردید.

آزمایش درصد جذب آب

آزمایش جذب آب یکی از روش‌های مهم برای ارزیابی دوام و نفوذپذیری بتن است. میزان جذب آب در بتن به کیفیت و تراکم ساختار آن بستگی دارد. نمونه‌های بتنی (مکعبی) پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه تهیه می‌شود. نمونه‌ها را در گرم‌خانه با دمای ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار می‌دهند تا رطوبت آن‌ها کاملاً تبخیر شود. سپس نمونه‌ها را وزن کرده و

مقدار آن را به‌عنوان وزن خشک ثبت می‌کنند. سپس نمونه‌ها در یک ظرف حاوی آب مقطر قرار می‌گیرند. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب می‌مانند. پس از این مدت، نمونه‌ها را از آب خارج کرده و با یک پارچه مرطوب سطح آن‌ها را تمیز می‌کنند. وزن نمونه‌ها را مجدداً اندازه‌گیری کرده و مقدار آن را به‌عنوان وزن اشباع ثبت شد.

آزمایش RCMT (آزمایش تسریع‌شده مهاجرت یون کلر)

آزمایش RCMT^۳ یکی از روش‌های تسریع‌شده برای اندازه‌گیری میزان نفوذ یون کلر در بتن است. نمونه‌های بتنی مطابق استاندارد تهیه شده و در شرایط استاندارد ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه عمل‌آوری می‌شوند. سطح بتن صاف و تمیز شده و برای قرارگیری در سلول آزمایش آماده می‌شود. نمونه استوانه‌ای بتن بین دو مخزن حاوی محلول NaCl و NaOH قرار داده شد. ولتاژ ۱۰ تا ۶۰ ولت بین دو الکترود اعمال می‌شود. پس از ۶ ساعت، نمونه بتن از دستگاه خارج شده و برش داده می‌شود. عمق نفوذ یون کلر با استفاده از محلول نیتрат نقره ($AgNO_3$) مشخص می‌شود. رنگ محلول نیترات نقره نشان‌دهنده مرز نفوذ یون کلر است.

میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FE-SEM)

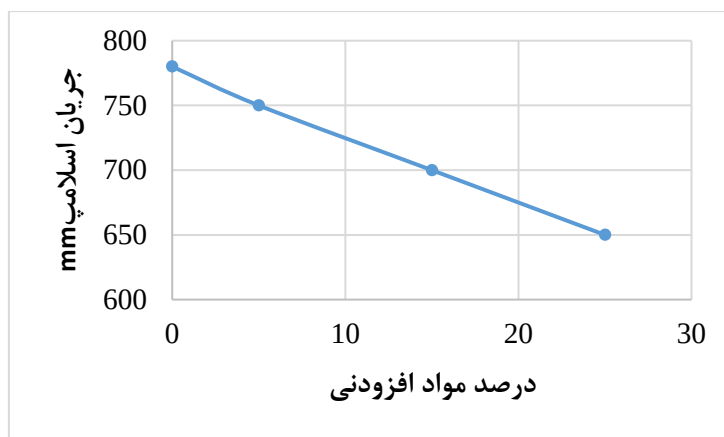
میکروسکوپ الکترونی (رویشی) گسیل میدانی^۴ با ویژگی محفظه بسیار بزرگ و سرعت خلاء بالا یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین دستگاه FESEM موجود در است. اساس کار این میکروسکوپ به این شکل است که از طریق تفنگ الکترونی، باریکه‌ای از الکترون‌ها ساطع می‌شوند و این پرتو با عبور از لنزهای مختلف،

نتایج و بحث

نتایج آزمایش اسلامپ و کارپذیری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۲ و شکل ۳ استخراج گردید.

جدول ۲- نتایج آزمایش جریان اسلامپ

ردیف	درصد متاکائولن	جریان اسلامپ (mm)	زمان T50 ثانیه	تحلیل نتایج
۱	۰٪	۷۸۰	۲-۳	روانی بسیار خوب، بدون افزایش چسبندگی
۲	۵٪	۷۵۰	۲/۵-۴	کمی کاهش روانی، افزایش مقاومت فشاری، کارایی مناسب
۳	۱۵٪	۷۰۰	۳-۵	کاهش بیشتر روانی، افزایش گرانروی، نیاز به فوق روان کننده
۴	۲۵٪	۶۵۰	۵-۷	کاهش شدید روانی، سختی در اجرا، نیاز به اصلاح طرح اختلاط



شکل ۳ - نمودار نتایج آزمایش جریان اسلامپ

تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی بتن باشد. مواد افزودنی مانند متاکائولن معمولاً باعث افزایش چسبندگی و کاهش روانی می‌شوند که این امر می‌تواند بر قابلیت جریان بتن تاثیر بگذارد. جریان پذیری مناسب برای بتن خودتراکم اهمیت حیاتی دارد تا بتن بتواند بدون نیاز به ویبره به راحتی در قالب‌ها جاری شود و تمام فضاهای قالب را پر کند. کاهش زیاد جریان پذیری می‌تواند باعث مشکلاتی در اجرای بتن شود، از جمله نیاز به افزودنی‌های روان کننده بیشتر یا تغییر در ترکیب مخلوط شود. در شکل ۴ آزمایش جریان اسلامپ نشان داده شده است.

تفسیر آزمایش جریان اسلامپ

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار مواد افزودنی از صفر درصد (بتن بدون افزودنی) تا حدود ۲۵ درصد، میزان جریان پذیری به صورت خطی و یکنواخت کاهش یافته است. به عبارتی، افزودن مواد باعث کاهش روانی و قابلیت جریان بتن خودتراکم شده است. در حالت بدون افزودنی، جریان پذیری حدود ۰/۹۵ میلی متر است که نسبتاً بالاترین مقدار است. با افزایش افزودنی‌ها، جریان پذیری به حدود ۰/۷ میلی متر در ۲۵ درصد مواد می‌رسد که کاهش قابل توجهی است. کاهش جریان پذیری با افزایش درصد مواد افزودنی می‌تواند به دلیل افزایش چسبندگی مخلوط، افزایش ریزدانه‌ها، یا



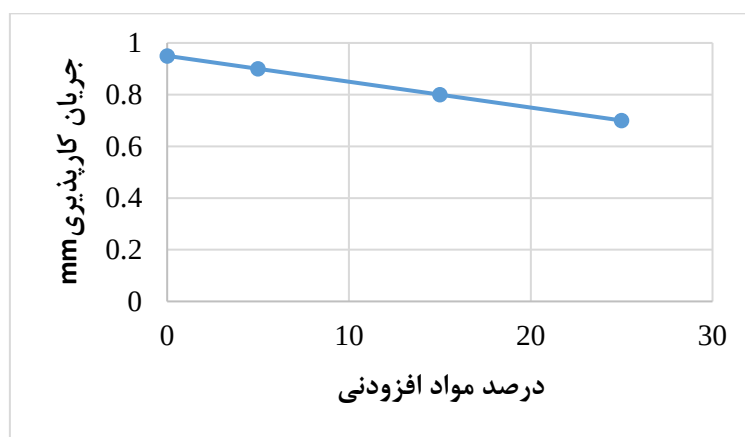
شکل ۴ - آزمایش جریان اسلامپ

نتایج آزمایش L BOX

نتایج میزان کارپذیری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۳ و شکل ۵ حاصل شده است.

جدول ۳ - نتایج آزمایش L BOX

ردیف	درصد متاکائولن	نسبت انسداد H2/H1	تحلیل نتایج
۱	۰٪	۰/۹۵	جریان مناسب، انسداد کم
۲	۵٪	۰/۹۰	کاهش جزئی روانی، اما هنوز در محدوده استاندارد
۳	۱۵٪	۰/۸۰	افزایش چسبندگی، احتمال انسداد میلگردها
۴	۲۵٪	۰/۷۰	بتن به سختی از میان میلگردها عبور می‌کند، مشکل در اجرا



شکل ۵ - نمودار آزمایش L BOX

تفسیر آزمایش آزمایش L BOX

نمودار بالا تأثیر درصد متاکائولن بر نسبت انسداد (H2/H1) در آزمون L-Box بتن خودتراکم را نشان می‌دهد. این نسبت شاخصی برای قابلیت عبور بتن از میان میلگردهاست و هرچه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده روانی و عبورپذیری بهتر بتن است.

- درصد متاکائولن ۰٪: بتن دارای روانی عالی است و به راحتی از بین میلگردها عبور می‌کند. عملکرد ایده‌آل برای بتن خودتراکم در اجراهای پیچیده.

- درصد متاکائولن ۵٪: کاهش جزئی در روانی دیده می‌شود اما همچنان در محدوده قابل قبول استاندارد (۰/۸-۰/۹) است.

- درصد متاکائولن ۱۵٪: به مرز پایین استاندارد روانی نزدیک شده است. نشانه‌هایی از افزایش چسبندگی و احتمال انسداد مشاهده می‌شود.

– درصد متاکائولن ۲۵٪: افت چشم‌گیر در روانی بتن. بتن. در شکل ۶ آزمایش L BOX نشان داده شده است. به‌سختی از میان میلگردها عبور می‌کند.



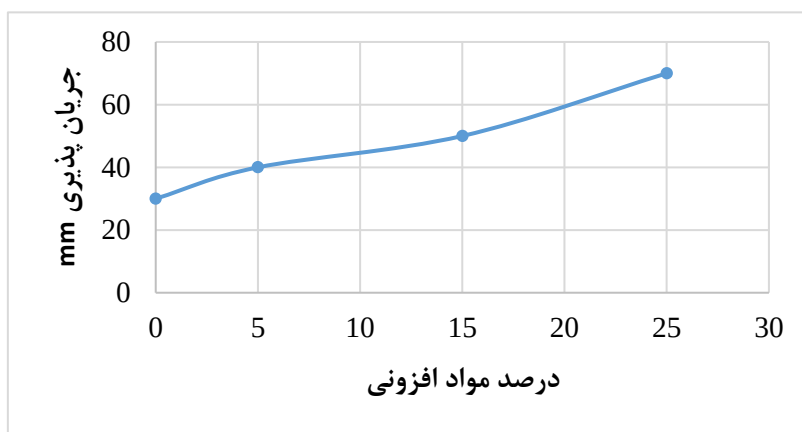
شکل ۶ – آزمایش L BOX

نتایج آزمایش U BOX

نتایج میزان کارپذیری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۴ و شکل ۷ می‌باشند.

جدول ۴ – نتایج آزمایش U BOX

ردیف	درصد متاکائولن	H_fill (mm)	تحلیل نتایج
۱	۰٪	۳۰	پرشده‌گی مناسب
۲	۵٪	۴۰	روانی کمی کمتر، اما پرشده‌گی خوب
۳	۱۵٪	۵۰	افزایش چسبندگی، پرشده‌گی دشوار
۴	۲۵٪	۷۰	بتن کاملاً چسبنده و سخت در عبور، نیاز به اصلاح



شکل ۷ – نمودار آزمایش U BOX

شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد متاکائولن در بتن خودتراکم، ارتفاع پرشده‌گی در آزمون U-box نیز به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. افزایش درصد متاکائولن، باعث کاهش روانی و افزایش چسبندگی بتن شده و در نتیجه عبور بتن از میان میلگردها

تفسیر آزمایش آزمایش U BOX

جلوگیری شود. درصد بهینه برای استفاده در بتن خودتراکم، در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد توصیه می‌شود. در شکل ۸ آزمایش L BOX نشان داده شده است.

دشوارتر می‌شود. بنابراین، هرچند متاکائولن برای دوام مفید است، اما مصرف آن باید به صورت کنترل شده و با افزودنی مناسب (مانند فوق روان کننده‌ها) تنظیم شود تا از بروز مشکلات اجرایی



شکل ۸ - آزمایش L BOX

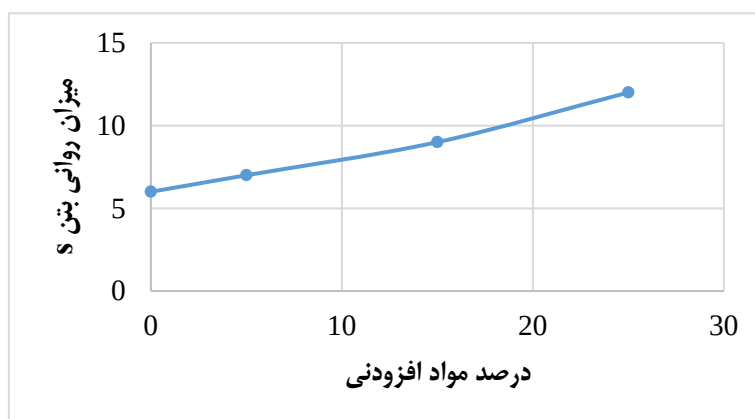
نتایج آزمایش V BOX

افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۵ و شکل ۹ ارائه شده است.

نتایج میزان روانی بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با

جدول ۵- نتایج آزمایش V BOX

نمونه	درصد متاکائولن	T_flow ثانیه	تحلیل نتایج
نمونه شاهد	۰٪	۶	جریان روان، گرانیروی مناسب
نمونه ۱	۵٪	۷	کمی افزایش گرانیروی اما همچنان مطلوب
نمونه ۲	۱۵٪	۹	افزایش گرانیروی، احتمال مشکل در پمپ شدن
نمونه ۳	۲۵٪	۱۲	جریان بسیار کند، احتمال انسداد



شکل ۹ - نمودار آزمایش V BOX

تفسیر آزمایش آزمایش V BOX

با افزایش درصد متاکائولن، گرانیروی نمونه‌ها افزایش یافته و زمان لازم برای جریان سیال بیشتر می‌شود. این تغییرات باعث کاهش

قابلیت پمپ شدن و احتمال گرفتگی سیستم می‌گردد. بنابراین، درصد متاکائولن باید در حد معقولی نگه داشته شود تا از مشکلات عملکردی جلوگیری شود.

– **نمونه شاهد (۰٪ متاکائولن):** زمان جریان ۶ ثانیه است که نشان‌دهنده جریان روان و گرانیروی مناسب می‌باشد. یعنی سیال به راحتی جریان دارد و مشکلی در پمپ شدن ندارد.

– **نمونه ۱ (۵٪ متاکائولن):** زمان جریان به ۷ ثانیه افزایش یافته که کمی گرانیروی بیش‌تر را نشان می‌دهد. با این وجود، گرانیروی هنوز در حد مطلوب است و جریان سیال بدون مشکل ادامه دارد.

– **نمونه ۲ (۱۵٪ متاکائولن):** زمان جریان به ۹ ثانیه رسیده که افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد دارد. این افزایش گرانیروی می‌تواند باعث ایجاد مشکل در پمپ شدن سیال شود و احتمال ایجاد انسداد جزئی وجود دارد.

– **نمونه ۳ (۲۵٪ متاکائولن):** زمان جریان به ۱۲ ثانیه افزایش یافته که نشان‌دهنده جریان بسیار کند و گرانیروی بالا است. این وضعیت احتمال انسداد و مشکلات جدی در پمپ شدن را بسیار زیاد می‌کند. در شکل ۱۰ آزمایش V BOX نشان داده شده است.



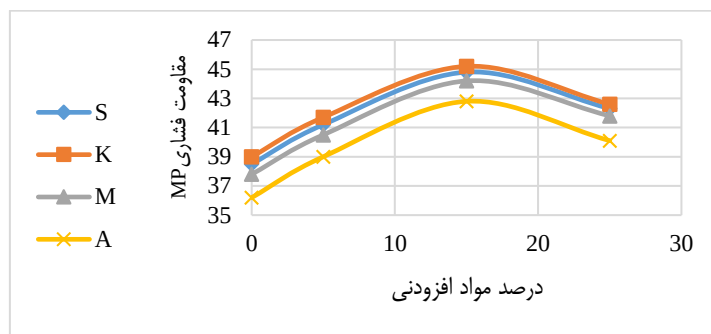
شکل ۱۰ – آزمایش V BOX

آزمایش مقاومت فشاری

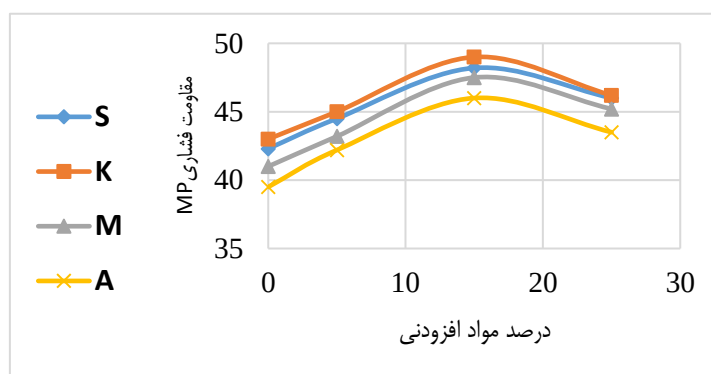
نتایج مقاومت فشاری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵ و ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در سه بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ و ۱۲۰ روزه در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۶ و اشکال ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ آرایه می‌گردند.

جدول ۶ – نتایج آزمایش مقاومت فشاری (MPa)

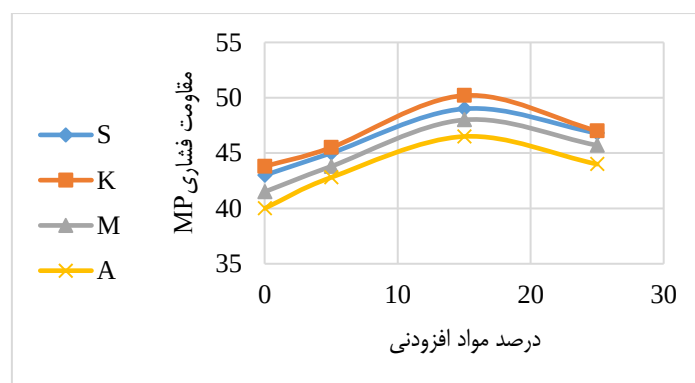
ردیف	محیط سولفاتی	درصد متاکائولن	روز ۲۸	روز ۹۰	روز ۱۲۰
۱	سولفات سدیم	۰٪	۳۸/۵	۴۲/۳	۴۳
۲		۵٪	۴۱/۲	۴۴/۵	۴۵
۳		۱۵٪	۴۴/۸	۴۸/۲	۴۹
۴		۲۵٪	۴۲/۳	۴۶	۴۶/۸
۵	سولفات کلسیم	۰٪	۳۹	۴۳	۴۳/۸
۶		۵٪	۴۱/۷	۴۵	۴۵/۵
۷		۱۵٪	۴۵/۲	۴۹	۵۰/۲
۸		۲۵٪	۴۲/۶	۴۶/۲	۴۷
۹	سولفات منیزیم	۰٪	۳۷/۸	۴۱	۴۱/۵
۱۰		۵٪	۴۰/۵	۴۳/۲	۴۳/۸
۱۱		۱۵٪	۴۴/۲	۴۷/۵	۴۸
۱۲		۲۵٪	۴۱/۸	۴۵/۲	۴۵/۷
۱۳	سولفات آمونیوم	۰٪	۳۶/۲	۳۹/۵	۴۰
۱۴		۵٪	۳۹	۴۲/۲	۴۲/۸
۱۵		۱۵٪	۴۲/۸	۴۶	۴۶/۵
۱۶		۲۵٪	۴۰/۱	۴۳/۵	۴۴



شکل ۱۱ - نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه



شکل ۱۲ - نمودار مقاومت فشاری ۹۰ روزه



شکل ۱۳ - نمودار مقاومت فشاری ۱۲۰ روزه

- کاهش متوسط در محیط سولفات منیزیم به دلیل تخریب بتن به دلیل جایگزینی یون‌های کلسیم با منیزیم و تشکیل ترکیباتی که باعث کاهش چسبندگی و مقاومت بتن می‌شود.
- کم‌ترین تأثیر مخرب و کم‌ترین کاهش مقاومت در محیط سولفات کلسیم مشاهده شد، در نتیجه سولفات کلسیم برخلاف سایر سولفات‌ها واکنش‌های تخریبی کم‌تری با بتن دارد.
هم‌چنین تغییرات مقاومت در بازه‌های زمانی مختلف به شرح زیر است:

نتایج حاصل از مقاومت فشاری را به صورت زیر می‌توان تفسیر نمود:

- بیش‌ترین کاهش مقاومت در محیط سولفات آمونیوم اتفاق می‌افتد. این موضوع می‌تواند به دلیل تخریب شدید و واکنش سولفات آمونیوم با محصولات هیدراتاسیونی، ایجاد ترکیبات ناپایدار و افزایش انبساط داخلی باشد.
- کاهش قابل توجه مقاومت در محیط سولفات سدیم ناشی از تشکیل اترینگایت^۵ اضافی و گسترش ریزترک‌ها در بتن، که به مرور موجب کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری شد.

آزمایش درصد جذب آب

نتایج درصد جذب آب در بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در سه بازه زمانی ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۷ و اشکال ۱۴، ۱۵ و ۱۶ می‌باشد.

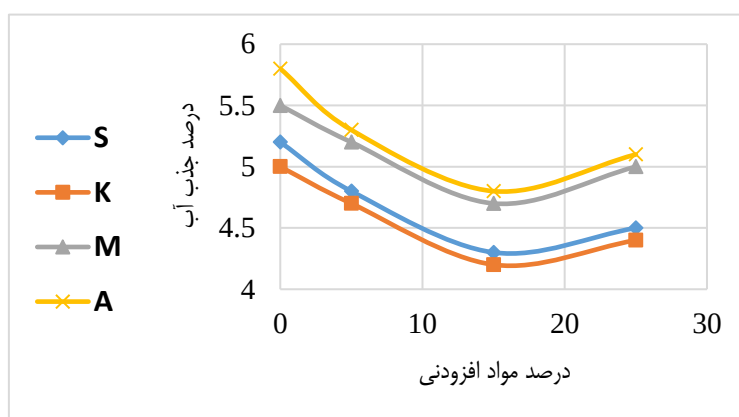
– در سن ۲۸ روزه: مقاومت فشاری اولیه در تمامی نمونه‌ها بالا بود و تأثیر سولفات‌ها هنوز محسوس نبود.

– در سن ۹۰ روزه: اثر مخرب سولفات‌ها، به‌ویژه سولفات آمونیوم و سولفات سدیم، آشکار شد و مقاومت در این محیط‌ها کاهش یافت.

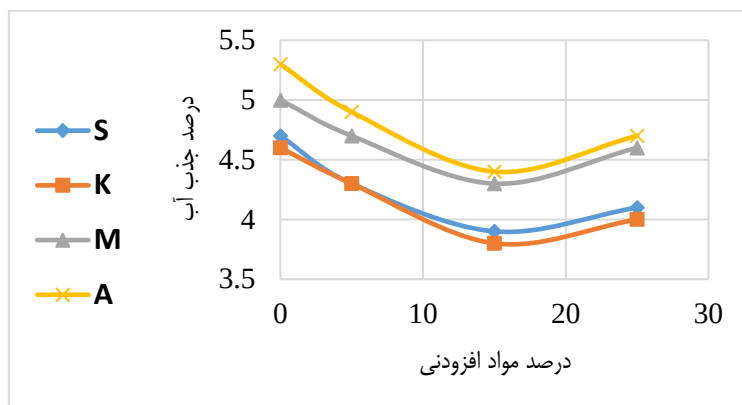
– در سن ۱۲۰ روزه: کاهش مقاومت ادامه یافت، اما نرخ کاهش در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن کمتر از بقیه موارد بود.

جدول ۷- نتایج درصد جذب آب

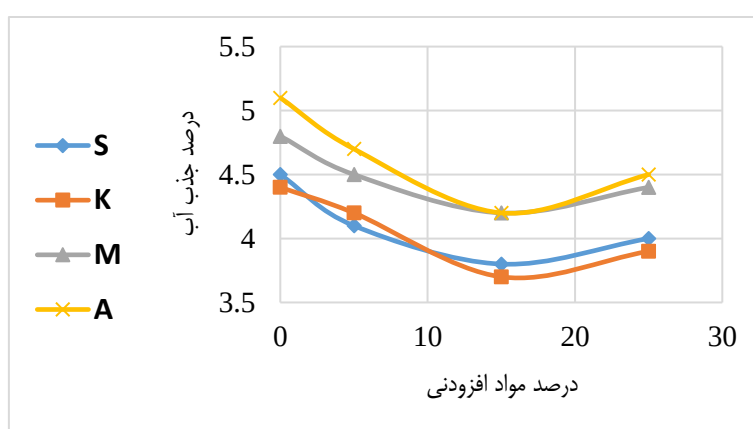
ردیف	محیط سولفاتی	درصد متاکائولن	روز ۲۸	روز ۹۰	روز ۱۲۰
۱	سولفات سدیم	٪۰	٪۵/۲	٪۴/۷	٪۴/۷
۲		٪۵	٪۴/۸	٪۴/۳	٪۴/۱
۳		٪۱۵	٪۴/۳	٪۳/۹	٪۳/۸
۴		٪۲۵	٪۴/۵	٪۴/۱	٪۴
۵	سولفات کلسیم	٪۰	٪۵	٪۴/۶	٪۴/۴
۶		٪۵	٪۴/۷	٪۴/۳	٪۴/۲۲
۷		٪۱۵	٪۴/۲	٪۳/۸	٪۳/۷
۸		٪۲۵	٪۴/۴	٪۴	٪۳/۹
۹	سولفات منیزیم	٪۰	٪۵/۵	٪۴	٪۴/۸
۱۰		٪۵	٪۵/۲	٪۴/۷	٪۴/۵
۱۱		٪۱۵	٪۴/۷	٪۴/۳	٪۴/۲
۱۲		٪۲۵	٪۵	٪۴/۶	٪۴/۴
۱۳	سولفات آمونیوم	٪۰	٪۵/۸	٪۵/۳۳	٪۵/۱
۱۴		٪۵	٪۵/۳	٪۴/۹	٪۴/۷
۱۵		٪۱۵	٪۴/۸	٪۴/۴	٪۴/۲
۱۶		٪۲۵	٪۵/۱	٪۴/۷	٪۴/۵



شکل ۱۴- نمودار درصد جذب آب ۲۸ روزه



شکل ۱۵- نمودار درصد جذب آب ۹۰ روزه



شکل ۱۶- نمودار درصد جذب آب ۱۲۰ روزه

سولفاتی کم‌تر است. سولفات کلسیم اثر مخرب کم‌تری داشته و ساختار بتن را کم‌تر تخریب می‌نماید. همچنین تغییرات درصد جذب آب در بازه‌های زمانی مختلف این گونه بوده است.

- در سن ۲۸ روزه: جذب آب در تمامی نمونه‌ها نسبتاً پایین بود و تأثیر محیط‌های سولفاتی هنوز شدید نبود.

- در سن ۹۰ روزه: افزایش جذب آب در محیط‌های سولفات آمونیوم و سولفات سدیم مشاهده شد. نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن همچنان جذب آب پایین‌تری داشتند.

- در سن ۱۲۰ روزه: جذب آب در تمامی نمونه‌ها افزایش یافت، اما این افزایش در نمونه‌های دارای ۱۵٪ متاکائولن، کم‌تر از سایر نمونه‌ها بود. بیشترین افزایش جذب آب در نمونه‌های ۲۵٪ متاکائولن و محیط سولفات آمونیوم مشاهده شد.

نتایج درصد نفوذ تسریع شده یون کلر

نتایج درصد جذب آب در بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در سه بازه زمانی ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۸ و اشکال ۱۷، ۱۸ و ۱۹ می‌باشد.

تأثیر محیط‌های سولفاتی بر درصد جذب آب به شرح زیر بوده است.

- بیش‌ترین میزان جذب آب در محیط سولفات آمونیوم بود. این موضوع بیش‌ترین آسیب را به ساختار بتن وارد کرد و خود منجر به افزایش جذب آب در طول زمان شد. دلیل این افزایش واکنش شدید یون‌های آمونیوم با ترکیبات سیمانی که باعث انبساط و ترک‌خوردگی شده و تخلخل بتن را افزایش داده است.

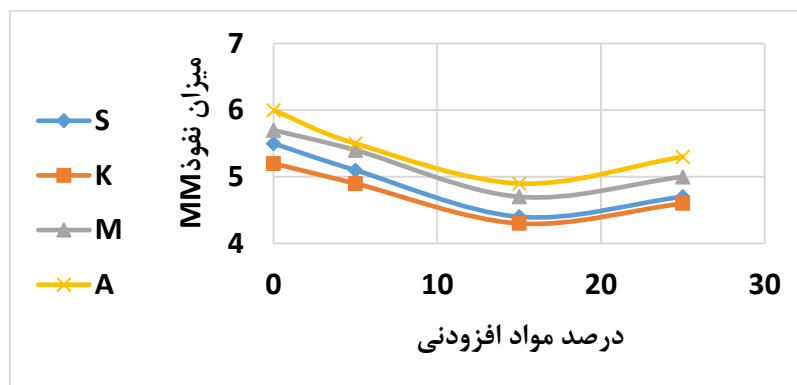
- افزایش جذب آب در محیط سولفات سدیم به دلیل واکنش‌های سولفاتی و تشکیل اترینگایت که خود باعث افزایش تخلخل شده و جذب آب را افزایش داد. میزان افزایش جذب آب کمتر از سولفات آمونیوم بوده اما بیش‌تر از سایر محیط‌های سولفاتی است.

- جذب آب متوسط در محیط سولفات منیزیم مشاهده گردید. جذب آب در نمونه‌های حاوی متاکائولن کم‌تر از نمونه شاهد بود، اما همچنان نسبت به سایر محیط‌ها زیاد است. واکنش منیزیم با فازهای سیمانی و تشکیل محصولات ضعیف می‌تواند باعث افزایش جذب آب باشد.

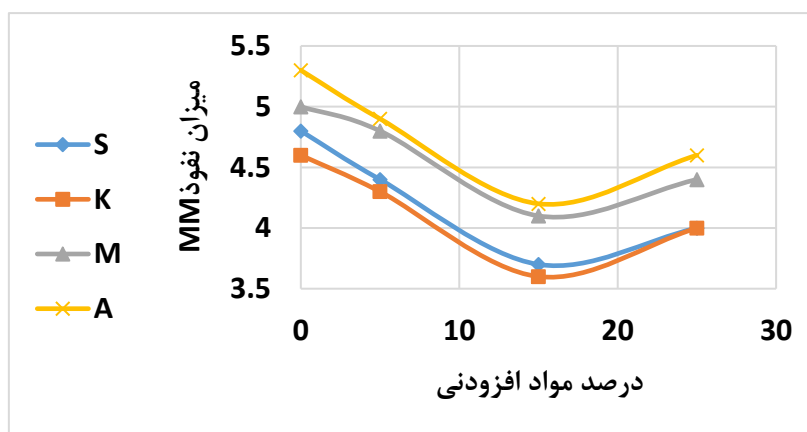
- کم‌ترین افزایش جذب آب در محیط سولفات کلسیم مشاهده شد. در این محیط، تغییرات جذب آب نسبت به سایر محیط‌های

جدول ۸ - نتایج درصد نفوذ یون کلر تسریع شده

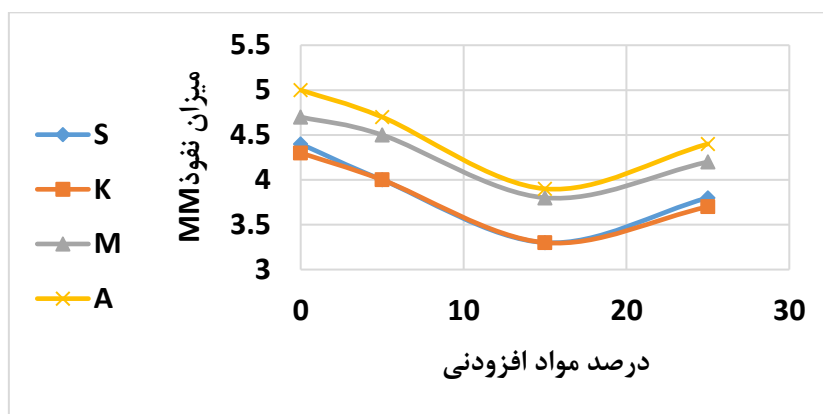
ردیف	محیط سولفاتی	درصد متاکائولن	روز ۲۸ (mm)	روز ۹۰ (mm)	روز ۱۲۰ (mm)
۱	سولفات سدیم	٪۰	۵/۵	۴/۸	۴/۴
۲		٪۵	۵/۱	۴/۴	۴
۳		٪۱۵	۴/۴	۳/۷	۳/۳
۴		٪۲۵	۴/۷	۴	۳/۸
۵	سولفات کلسیم	٪۰	۵/۲	۴/۶	۴/۳
۶		٪۵	۴/۹	۴/۳	۴
۷		٪۱۵	۴/۳	۳/۶	۳/۳
۸		٪۲۵	۴/۶	۴	۳/۷
۹	سولفات منیزیم	٪۰	۵/۷	۵	۴/۷
۱۰		٪۵	۵/۴	۴/۸	۴/۵
۱۱		٪۱۵	۴/۷	۴/۱	۳/۸
۱۲		٪۲۵	۵	۴/۴	۴/۲
۱۳	سولفات آمونیوم	٪۰	۶	۵/۳	۵
۱۴		٪۵	۵/۵	۴/۹	۴/۷
۱۵		٪۱۵	۴/۹	۴/۲	۳/۹
۱۶		٪۲۵	۵/۳	۴/۶	۴/۴



شکل ۱۷- نمودار درصد نفوذ یون کلر ۲۸ روزه



شکل ۱۸- نمودار درصد نفوذ یون کلر ۹۰ روزه



شکل ۱۹- نمودار درصد نفوذ یون کلر ۱۲۰ روزه

- کمترین میزان نفوذ یون کلر در محیط سولفات کلسیم مشاهده گردید. سولفات کلسیم اثر تخریبی کمتری داشته و ساختار بتن را کمتر آسیب زده است. در این محیط، نفوذ یون کلر کمترین مقدار را در بین چهار محیط سولفاتی داشت. علاوه بر این تغییرات نفوذ یون کلر در بازه‌های زمانی مختلف چنین می باشد.

- در سن ۲۸ روزه: تأثیر سولفات‌ها هنوز محسوس نبود و نفوذ یون کلر در تمامی نمونه‌ها کمتر بود.

- در سن ۹۰ روزه: اثر مخرب سولفات‌ها به‌ویژه در محیط سولفات آمونیوم و سولفات سدیم افزایش یافت. نمونه‌های دارای ۱۵٪ متاکائولن مقاومت بهتری در برابر نفوذ کلریدها نشان دادند.

- در سن ۱۲۰ روزه: نفوذ کلرید در تمامی نمونه‌ها افزایش یافت، اما این افزایش در نمونه‌های دارای ۱۵٪ متاکائولن کمتر از سایر نمونه‌ها بود. بیشترین نفوذ یون کلر در نمونه‌های ۲۵٪ متاکائولن و محیط سولفات آمونیوم مشاهده شد.

درصد متاکائولن در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۹ می‌باشد.

همانگونه که مشاهده گردید تأثیر محیط‌های سولفاتی بر نفوذ یون کلر این گونه بود.

- بیشترین میزان نفوذ کلریدها در محیط سولفات آمونیوم مشاهده گردید. واکنش شدید سولفات آمونیوم با ترکیبات سیمانی باعث گسترش ترک‌های داخلی و افزایش نفوذپذیری بوده است. نمونه‌های قرار گرفته در این محیط، بیشترین میزان نفوذ یون کلر را نشان دادند.

- افزایش نفوذ کلریدها در محیط سولفات سدیم ناشی از تشکیل اترینگیت اضافی و افزایش ریزترک‌ها است. این موضوع باعث افزایش نفوذ یون کلر شد. میزان نفوذ در این محیط کمتر از سولفات آمونیوم بوده اما بیشتر از سایر محیط‌ها است.

- نفوذ متوسط کلرید در محیط سولفات منیزیم ناشی از واکنش‌های مخرب با ترکیبات سیمانی و باعث جایگزینی یون‌های کلسیم با منیزیم شد، که نهایتاً منجر به افزایش میزان نفوذ یون کلر گردید.

آزمایش‌های تنش و کرنش نهایی

نتایج آزمایش‌های تنش و کرنش نهایی در بازه زمانی ۲۸ روزه بتن خود متراکم در نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵

جدول ۹- نتایج تنش و کرنش نهایی ۲۸ روزه

ردیف	محیط سولفاتی	تنش (MPa)	کرنش (mm/mm)
۱	شاهد	۲۱/۲	۰/۰۰۳۸
۲	۵٪ متاکائولن	۲۳/۱	۰/۰۰۴۳
۳	۱۵٪ متاکائولن	۲۵/۳	۰/۰۰۶۵
۴	۲۵٪ متاکائولن	۲۳/۹	۰/۰۰۵۷
۵	شاهد	۲۲	۰/۰۰۰۴
۶	۵٪ متاکائولن	۲۳/۶	۰/۰۰۴۷
۷	۱۵٪ متاکائولن	۲۵/۵	۰/۰۰۶۹
۸	۲۵٪ متاکائولن	۲۴/۱	۰/۰۰۶۲

۰/۰۰۳۹	۲۱/۴	سولفات منیزیم	شاهد	۹
۰/۰۰۴۱	۲۲/۹		۵٪ متاکائولن	۱۰
۰/۰۰۶۵	۲۵		۱۵٪ متاکائولن	۱۱
۰/۰۰۵۴	۲۳/۶		۲۵٪ متاکائولن	۱۲
۰/۰۰۳۵	۲۰/۴	سولفات آمونیوم	شاهد	۱۳
۰/۰۰۴۱	۲۲		۵٪ متاکائولن	۱۴
۰/۰۰۶۱	۲۴/۲		۱۵٪ متاکائولن	۱۵
۰/۰۰۴۴	۲۲/۷		۲۵٪ متاکائولن	۱۶

نتایج تنش و کرنش نهایی بتن خود متراکم در نمونه شاهد و روزه و در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۱۰ نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در بازه زمانی ۹۰ می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج تنش و کرنش نهایی ۹۰ روزه

ردیف	نمونه	محیط سولفاتی	تنش (MPa)	کرنش (mm/mm)
۱	شاهد	سولفات سدیم	۲۳/۹	۰/۰۰۵۷
۲	۵٪ متاکائولن		۲۵/۱	۰/۰۰۶۶
۳	۱۵٪ متاکائولن		۲۷/۲	۰/۰۰۷۸
۴	۲۵٪ متاکائولن		۲۶	۰/۰۰۷
۵	شاهد	سولفات کلسیم	۲۴/۳	۰/۰۰۶۲
۶	۵٪ متاکائولن		۲۵/۴	۰/۰۰۶۵
۷	۱۵٪ متاکائولن		۲۷/۷	۰/۰۰۸۱
۸	۲۵٪ متاکائولن		۲۶/۱	۰/۰۰۷
۹	شاهد	سولفات منیزیم	۲۳/۲	۰/۰۰۴۳
۱۰	۵٪ متاکائولن		۲۴/۴	۰/۰۰۶۱
۱۱	۱۵٪ متاکائولن		۲۶/۸	۰/۰۰۷۶
۱۲	۲۵٪ متاکائولن		۲۵/۵	۰/۰۰۶۹
۱۳	شاهد	سولفات آمونیوم	۲۲/۳	۰/۰۰۴۲
۱۴	۵٪ متاکائولن		۲۳/۸	۰/۰۰۴۹
۱۵	۱۵٪ متاکائولن		۲۶	۰/۰۰۷
۱۶	۲۵٪ متاکائولن		۲۴/۶	۰/۰۰۶۱

نتایج تنش و کرنش نهایی خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در بازه زمانی ۱۲۰ روزه و در چهار محیط سولفاتی متفاوت در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱- نتایج تنش و کرنش نهایی ۱۲۰ روزه

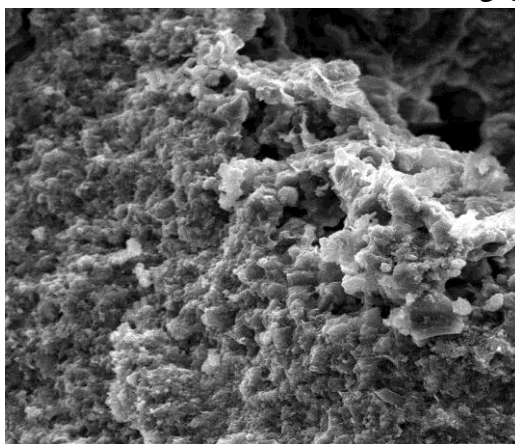
ردیف	نمونه	محیط سولفاتی	تنش (MPa)	کرنش (mm/mm)
۱	شاهد	سولفات سدیم	۲۴/۳	۰/۰۰۶۲
۲	۵٪ متاکائولن		۲۵/۴	۰/۰۰۶۹
۳	۱۵٪ متاکائولن		۲۷/۷	۰/۰۰۸۱
۴	۲۵٪ متاکائولن		۲۶/۴	۰/۰۰۷۶
۵	شاهد	سولفات کلسیم	۲۴/۷	۰/۰۰۶۱
۶	۵٪ متاکائولن		۲۵/۷	۰/۰۰۶۹

۰/۰۰۸۸	۲۸/۴	۱۵٪ متاکائولن	۷
۰/۰۰۷۶	۲۶/۶	۲۵٪ متاکائولن	۸
۰/۰۰۴۳	۲۳/۴	شاهد سولفات منیزیم	۹
۰/۰۰۶۱	۲۴/۷	۵٪ متاکائولن	۱۰
۰/۰۰۷۸	۲۷/۱	۱۵٪ متاکائولن	۱۱
۰/۰۰۶۹	۲۵/۸	۲۵٪ متاکائولن	۱۲
۰/۰۰۴۲	۲۲/۶	شاهد سولفات آمونیوم	۱۳
۰/۰۰۶۲	۲۴/۲	۵٪ متاکائولن	۱۴
۰/۰۰۰۷	۲۶/۳	۱۵٪ متاکائولن	۱۵
۰/۰۰۶۱	۲۴/۹	۲۵٪ متاکائولن	۱۶

رابطه بین تنش و کرنش در محیط‌های خورنده سولفاتی نشان می‌دهد که بتن‌هایی که مقاومت فشاری بالاتری داشتند (خصوصاً نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن)، کرنش کم‌تری را تجربه کردند. اما افزایش کرنش در نمونه‌های با ۲۵٪ متاکائولن نشان‌دهنده کاهش سختی بتن و افزایش تغییرشکل در بارگذاری است.

نتایج ریز ساختار

شکل ۲۰ ریز ساختار بتن با افزودن ۱۵ درصد متاکائولن جایگزین سیمان در شکل ۱۸ شده است.



شکل ۲۰- تصویر ریز ساختار بتن با افزودن ۱۵ درصد متاکائولن

سیمانی شده است. این عامل موجب کاهش مقاومت بتن در طول زمان شده است.

محیط سولفات کلسیم: نسبت به سایر محیط‌ها تأثیر مخرب کم‌تری داشته و ساختار بتن کم‌تر دچار تغییر شده است.

محیط سولفات آمونیوم: بیش‌ترین آسیب را ایجاد کرده و در تصاویر میکروسکوپی، مناطق دارای فازهای ضعیف شده و حفره‌های ریز میکروسکوپی به وضوح دیده می‌شوند.

همان‌گونه که مشاهده شد تأثیر محیط‌های سولفاتی بر تنش و کرنش نهایی این‌گونه است.

- محیط سولفات کلسیم کم‌ترین اثر تخریبی را بر بتن داشت، زیرا نمونه‌ها در این محیط نمونه‌ها بالاترین مقدار حفظ مقاومت را در طول زمان داشتند.

- در مقابل، محیط سولفات آمونیوم بیش‌ترین تخریب را ایجاد کرد، به‌طوری‌که نمونه‌های بتن در این محیط بیش‌ترین کاهش مقاومت و افزایش کرنش را نشان دادند.

- سولفات منیزیم و سولفات سدیم اثرات تخریبی متوسطی داشتند، اما همچنان باعث افت مقاومت در طول زمان مشاهده شد.

تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهند که نمونه‌های بتنی حاوی متاکائولن ۱۵٪ دارای ساختاری متراکم‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. این به دلیل واکنش‌های پوزولانی متاکائولن با هیدروکسید کلسیم آزاد در بتن است که منجر به تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) بیش‌تر و کاهش فضای خالی می‌شود. در هر محیط جداگانه می‌توان این‌گونه گفت:

محیط سولفات سدیم: باعث تشکیل ژپس در داخل ساختار بتن شده که منجر به افزایش حجم و ترک‌های ریز در ماتریس

محیط سولفات منیزیم: باعث تخریب شدیدتر خمیر سیمان و انحلال فاز C-S-H شده که منجر به تضعیف اتصال بین سنگدانه‌ها و ماتریس سیمانی شده است. درخصوص تأثیر مقدار متاکائولن مشاهده گردید که در نمونه‌های با ۵٪ متاکائولن، بهبود در ساختار بتن نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد، اما میزان واکنش پوزولانی به اندازه کافی نبود که

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در دهه‌های اخیر، دغدغه‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بیش از حد انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی، به‌ویژه در صنعت سیمان، موجب شده است تا پژوهشگران و مهندسان به دنبال راهکارهایی جهت توسعه مصالح ساختمانی پایدار باشند. یکی از مهم‌ترین اهداف در این زمینه، کاهش مصرف سیمان پرتلند از طریق استفاده از مواد جایگزین پوزولانی است که هم عملکرد فنی مناسبی داشته باشند و هم از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی توجیه‌پذیر باشند. در همین راستا، متاکائولن به‌عنوان یک پوزولان طبیعی فعال، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با متاکائولن در بتن خودتراکم (SCC) انجام شد تا عملکرد بتن از نظر مقاومت مکانیکی، دوام در برابر محیط‌های خورنده سولفاتی، خواص بتن تازه و ملاحظات زیست‌محیطی ارزیابی شود. بتن خودتراکم، به‌دلیل ویژگی‌های ممتاز در کارایی، کاهش نیروی انسانی در اجرا و افزایش کیفیت سطحی، در پروژه‌های عمرانی بزرگ و پیچیده به‌طور گسترده استفاده می‌شود. با این حال، افزودن مواد جایگزین به این نوع بتن ممکن است خواص تازه و سخت‌شده آن را تحت تأثیر قرار دهد که بررسی هم‌زمان این ویژگی‌ها ضرورت دارد. یکی از جنبه‌های مهم بررسی‌شده در این تحقیق، تأثیر متاکائولن بر خواص بتن تازه بود. نتایج نشان داد که افزودن متاکائولن با درصدهای مختلف بر اسلامپ جریان، زمان جریان، پایداری در برابر جداسازی و ویسکوزیته بتن تازه تأثیرگذار است. درصدهای پایین متاکائولن (۵ تا ۱۵ درصد) منجر به بهبود یکنواختی، کاهش جداسازی و بهبود پایداری بتن تازه شد. دلیل این امر، ذرات بسیار ریز متاکائولن است که مانند یک فیلر عمل کرده و فضای خالی بین ذرات را پر می‌کند. همچنین، سطح ویژه بالای متاکائولن موجب جذب بیشتر آب آزاد شده و در نتیجه ویسکوزیته بتن افزایش می‌یابد. این افزایش ویسکوزیته، پایداری بتن تازه را در برابر جداسازی بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، در درصدهای بالاتر (۲۵ درصد)، به‌دلیل افزایش شدید سطح جذب آب، میزان روانی

بهبود قابل توجهی در دوام ایجاد کند. نمونه‌های ۱۵٪ متاکائولن بیشترین تراکم و کمترین تخلخل را نشان دادند، که باعث افزایش دوام بتن شد. در نمونه‌های ۲۵٪ متاکائولن، با وجود تراکم بیشتر، میزان فضاهای خالی ناشی از کاهش سیمان افزایش یافته و در برخی مناطق، میکروتکرک‌ها و افت چسبندگی بین سنگدانه و خمیر سیمان مشاهده شده است.

بتن کاهش پیدا کرد و نیاز به فوق روان‌کننده بیشتر شد. قابلیت پرکنندگی و عبورپذیری بتن خودتراکم نیز تحت تأثیر حضور متاکائولن بهبود یافت، به‌ویژه در درصد ۱۵٪ که به‌عنوان مقدار بهینه در این پژوهش شناخته شد. در این مقدار، بتن توانست بدون انسداد در میان میلگردها جریان یابد و سطحی یکنواخت و بدون حفره ایجاد کند. زمان گیرش اولیه و نهایی نیز با افزایش درصد متاکائولن اندکی کاهش یافت، که این امر به فعالیت پوزولانی بالای متاکائولن و واکنش سریع آن با هیدروکسید کلسیم تولیدشده در فرآیند هیدراتاسیون سیمان بازمی‌گردد. این ویژگی می‌تواند در شرایط سرد یا برای بتن‌ریزی سریع مفید باشد. از نظر خواص مکانیکی، نتایج نشان داد که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با متاکائولن بیشترین افزایش مقاومت فشاری را در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه فراهم کرد. این افزایش مقاومت به واکنش‌های پوزولانی فعال و تشکیل ترکیبات ثانویه ژل C-S-H نسبت داده می‌شود که موجب انسجام بیشتر خمیر سیمان و کاهش فضای خالی در بتن می‌شود. در بررسی دوام بتن در محیط‌های حاوی یون‌های سولفات مختلف (سدیم، منیزیم، کلسیم و آمونیوم)، مشخص شد که نمونه‌های حاوی متاکائولن مقاومت بالاتری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند. به‌ویژه در مواجهه با سولفات آمونیوم که بیشترین اثر مخرب را داشت، بتن‌های اصلاح‌شده با متاکائولن ترک‌خوردگی، تورم و تخریب سطحی بسیار کمتری داشتند. ریزساختار متراکم این نمونه‌ها در تصاویر SEM نیز تأیید شد. کاهش تخلخل و افزایش تراکم مانع از نفوذ یون‌های مهاجم به عمق بتن گردید. از نظر رفتار تنش-کرنش نیز مشخص شد که نمونه‌های دارای متاکائولن، به‌ویژه در درصد ۱۵٪، مدول الاستیسیته بالاتری داشته و مقاومت به تغییر شکل‌های ناگهانی بیشتری دارند. این خاصیت در افزایش مقاومت سازه در برابر بارهای لرزه‌ای یا ضربه‌ای اهمیت زیادی دارد. از منظر زیست‌محیطی، استفاده از متاکائولن موجب کاهش مصرف سیمان پرتلند و در نتیجه کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن گردید. با توجه به این‌که هر تن سیمان حدود یک تن CO₂ منتشر می‌کند، جایگزینی ۱۵٪ از سیمان با متاکائولن تأثیر مستقیمی بر

کاهش اثرات گلخانه‌ای دارد. همچنین این جایگزینی به حفظ منابع طبیعی نظیر سنگ آهک و خاک رس کمک می‌کند و از استخراج بی‌رویه این مواد جلوگیری می‌نماید. از نظر اقتصادی نیز، گرچه قیمت متاکائولن نسبت به سیمان ممکن است بالاتر باشد، اما به دلیل افزایش دوام، کاهش نیاز به تعمیرات و افزایش عمر مفید سازه، هزینه چرخه عمر سازه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در پروژه‌های زیربنایی مانند پل‌ها، مترو، سدها و سازه‌های دریایی، این صرفه‌جویی مالی بسیار قابل توجه خواهد

بود. با توجه به نتایج حاصل شده در این پژوهش، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جایگزینی بهینه‌ی ۱۵ درصد سیمان با متاکائولن در بتن خودتراکم، نه تنها موجب بهبود خواص بتن تازه (روانی، پایداری، زمان گیرش) و سخت شده (مقاومت فشاری، دوام، ریزساختار) می‌گردد، بلکه نقش بسیار مؤثری در کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش پایداری در صنعت ساخت‌وساز دارد.

References

1. John O. Eze, Chika A. Nwosu, Ifeanyi M. Obi, Performance of Concrete Using Metakaolin as Cement Partial Replacement Material, ARID ZONE JOURNAL OF ENGINEERING, TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT, 2025
2. Chuheng Zhong, Dongping Wang, Lijuan Zhang, WeiQi Mao, Sijia Xing, Jinhui Chen & Yuan Xiao, Durability analysis of metakaolin recycled concrete under sulphate dry and wet cycle Scientific Reports 2024
3. Shweta Patel, Ravi Kumar, Meenakshi Singh, Experimental Investigation of Mechanical and Durability Performances of Self-Compacting Concrete Blended with Bagasse Ash, Metakaolin, and Glass Fiber, Frontiers in Materials, 2024
4. Irfan Majeed, Mir Suhail Ahmed, Experimental Study and Analysis of Strength Properties and Sulfate Resistance of Self-Compacting Concrete Using Different Admixtures, IJRASET Journal, 2024
5. Mohammadyan-Yasouj, Seyed Saeid Rahimian Koloor, Utilization of metakaolin on the properties of self-consolidating concrete: A review, Seyed Esmaeil Construction and Building Materials Volume 389, 31 July 2023, 131605
6. Ali R. Rajabi, Saeed Yousefi, Mohammad A. Sadeghi, Experimental Investigation on the Durability of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete in Aggressive Environments, Asian Journal of Civil Engineering, 2023
7. Abdollahzadeh, M., & Hosseini, S. A.. Metakaolin-based SCC: Resistance to sulfate environments and long-term performance. *Journal of Cleaner Production*, (2023) 381, 135188.
8. Ming Li, Yifan Zhao, Hao Chen, Jun Wang, Investigation on the Sulfate Attack of Metakaolin Blended Recycled Concrete Based on Percolation Theory, Journal of Materials Research and Technology, 2023
9. Kamyar Nabighods, Ashkan Sarada, Mohammad Mohtasham Moein, Mir Alimohammad Mirgozar Langaroudi, Juliana Byzyka, Moses Karakouzian, Evaluation of self-compacting concrete containing pozzolan (zeolite, metakaolin & silica fume) and polypropylene fiber against sulfate attacks with different PH: an experimental study, Practice-Oriented Paper, 2023,
10. Wei Zhang, Jiawei Liu, Xiaolong Wang, Qiang Li, Performance of Alkali-Activated Self-Compacting Concrete with Incorporation of Nanosilica and Metakaolin, Sustainability, 2022
11. Fatemeh Khodabakhshian, Zahra Sadeghi, Ali Rezaei, Cement with Fly Ash and Metakaolin Blend—Drive towards a More Sustainable Construction, Energies, 2022
12. IPCC.. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022)
13. Zhang, Y., & Shi, C.. Influence of supplementary cementitious materials on the stress-strain behavior of concrete under compression. *Construction and Building Materials*, (2022) 314, 125677.
14. Bakhshi, M., & Allahverdi, A.. Sulfate attack on concrete: Mechanisms, effects and preventive strategies. *Cement and Concrete Research*, (2021) 146, 106449.
15. Wang, Y., Zhang, M., & Long, W.. Toward sustainable concrete: The role of supplementary cementitious materials in reducing carbon footprint. *Construction and Building Materials*, (2021) 270, 121371.
16. Okamura, H., & Ouchi, M.. Self-compacting concrete: development, present use and future. *Journal of Advanced Concrete Technology*, (2020), 18(4), 141–150
17. Ghasemi, T., & Ramezani-pour, A. A.. Influence of metakaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting concrete under aggressive environments. *Journal of Building Engineering*, (2020) 32, 101586.
18. Soutsos, M. N., & Le, T. T.. Effect of metakaolin on concrete durability and performance. *Materials and Structures*, (2019) 52(1), 1–13.
19. Hocine Siad, Siham Kamali-Bernard, H.A. Mesbah, G. Escadeillas, Mohamed Mouli, H. Khelafi, Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment: Influence of different mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 2013, Volume 47, Pages 1188-1200

میکروسیلیس، اولین همایش ملی سازه زلزله ژئوتکنیک، سال ۱۳۸۹.

۲۶. رمضانپور، علی اکبر، میروالد سید سجاده، آرامون، احسان، پیدایش، منصور، بررسی اثر چهار نوع از پوزولان های طبیعی ایران بر دوام بتن های سازه ای در برابر حمله سولفاتی، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)، سال ۱۳۹۳، دوره چهل ششم، شماره ۲

۲۷. ربانی، شهاب، حسن زاده، محسن، کیاچهر، بهفرنیا، بررسی اثر پوزولان های مختلف بر عملکرد ملات در محیط سولفاته، چهارمین کنفرانس ملی ایران، ۱۳۹۱

۲۸. فرخ زاد، رضا، یاسری، سجاده، انتظاریان، محمد حسین، یآوری، امیر، بررسی تاثیرات سولفات ها بر مقاومت فشاری انواع بتن های پوزولانی و اندازه گیری میزان نفوذ با آزمون فراصوت در سنین مختلف، تحقیقات بتن ۱۳۹۵، سال نهم شماره اول

۲۹. نادری، محمود، رشوند آوه، ابولفضل، صابری ورزنده، علی، بررسی پایایی بتن های خود متراکم ساخته شده از سنگ دانه های مختلف تحت اثر محیط سولفاته با استفاده از آزمون پیچش، مهندسی عمران، ۱۴۰۱، شماره ۱.

۲۰. آتش بند، شهام، صابر ماهانی، محسن، الهی حمیدرضا، بررسی آزمایشگاهی اثرات سیمان ضد سولفات و ترکیبات باریم بر مقاومت خاک-سیمان در محیط سولفاته، نشریه زمین شناسی مهندسی ۱۴۰۰، جلد پانزدهم، شماره ۲

۲۱. آدرسی، مصطفی، مرادی باصری، حامد، مروری بر روش های آزمایشگاهی و تحلیلی درخصوص بررسی رفتار بتن تحت حملات سولفاته و اسیدی، فصلنامه علمی جاده، ۱۴۰۲، سال بیست و یکم، دوره چهارم، شماره ۱۱۷

۲۲. امیری، محمد، تنیده، پریسا، ارزیابی ریز ساختاری تاثیر محیط های سولفاته بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری، تحقیقات بتن، سال ۹۹، سال سیزدهم شماره ۲

۲۳. احمدی، جمال، بیگدلو، احمد، سلیمانی راد، مهدی، تاثیر استفاده از ژئولیت، میکروسیلیس و متاکاتولن بر کارایی و مقاومت بتن خود متراکم، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست ۱۳۹۶، جلد ۷۴، شماره ۳

۲۴. انتظاری، علیرضا، اسماعیلی، جمشید، بررسی منحنی تنش و کرنش بتن سبک سازه ای غیر محصور، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، سال ۱۳۸۹، جلد ۴۰ شماره ۳.

۲۵. حسن زاده، محسن، کیاچهر، بهفرنیا، ربانی، شهاب، بررسی تاثیر محیط سولفاته بر مقاومت فشاری ملات های حاوی پوزولان



Experimental Analysis of Durability and Mechanical Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Metakaolin in Sulfate Environments in order to Reduce Cement Consumption and Protect Environment

Karrar AbdulAmir Nahi

Master's Student of Civil Engineering, Faculty of Building Industry and Environment, Islamic Azad University, Shiraz Branch, Iran

MohammadAmir
Sherafati*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Hadi Fatemi

M.Sc. in Civil Engineering, Faculty of Building Industry and Environment, Islamic Azad University, Shiraz Branch, Iran

Received: 6 May 2025

Accepted: 12 June 2025

Keywords: Self-Compacting Concrete, Metakolin, CO₂ Emission Reduction, Concrete Durability, Sustainable Development, Corrosion Sulfate

Extended Abstract

Introduction: In recent years, the construction industry has been recognized as one of the largest consumers of natural resources and producers of greenhouse gases. One of the most important materials used in this industry is Portland cement, the production of which consumes significant amounts of energy and emits carbon dioxide (CO₂) one of the main greenhouse gases into the atmosphere. This issue not only affects air quality and human health but also accelerates global warming and climate change. Moreover, cement production relies heavily on raw materials such as limestone and clay, and excessive extraction of these materials leads to depletion of non-renewable natural resources and threatens environmental sustainability.

Materials and Methods: This study aimed to investigate the effect of partially replacing cement with metakaolin in self-compacting concrete (SCC) and to evaluate the performance of this concrete in sulfate-rich corrosive environments. For this purpose, SCC samples were prepared with three different metakaolin replacement levels: 5%, 15%, and 25% by weight of cement. To simulate corrosive environmental conditions, samples were exposed to four sulfate solutions containing sulfate ions from sodium sulfate (Na₂SO₄), magnesium sulfate (MgSO₄), calcium sulfate (CaSO₄), and ammonium sulfate ((NH₄)₂SO₄). These sulfate ions were selected due to their destructive effects on concrete structures, particularly in industrial and marine environments, to accurately assess the concrete's resistance under realistic conditions.

Results and Discussion: Laboratory results demonstrated that incorporating metakaolin significantly improved the characteristics of self-compacting concrete. Among the tested samples, the mixture containing 15% metakaolin exhibited the best performance. This mixture showed a notable increase in compressive strength compared to the control sample (without metakaolin). Additionally, water absorption decreased, indicating reduced porosity and increased density of the concrete microstructure. SEM images confirmed greater cohesion and fewer voids within the internal structure of the concrete. The 15% metakaolin concrete also exhibited higher resistance to sulfate environments, particularly against magnesium and ammonium ions, with less surface deterioration and cracking observed. Furthermore, the partial replacement of cement with metakaolin reduced the CO₂ emissions associated with concrete production, contributing effectively to minimizing the environmental impact of this widely used construction material. Compressive strength tests at various ages showed that the 15% metakaolin mixture performed better not only at 28 days but also at early (7 days) and late (90 days) stages, indicating good pozzolanic reactivity and long-term microstructural development. Reduced water absorption also implies lower permeability to aggressive ions, thereby decreasing long-term degradation. Stress-strain analysis showed that metakaolin-containing samples had higher stiffness (elastic modulus), reflecting increased concrete hardness and resistance to sudden deformations under cyclic loads.

Conclusion: Based on the obtained results, it can be concluded that the optimal use of 15% metakaolin not only enhances the mechanical properties and durability of self-compacting concrete against sulfate ion attack but also plays a significant role in reducing environmental pollution by lowering cement consumption. The use of metakaolin aligns with sustainable development approaches, potentially extending the service life of structures under harsh environmental conditions.

Corresponding author: MohammadAmir Sherafati

Address: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Tel: +989173870014 **Email:** MA.Sherafati@iau.ac.ir

Citation: AbdulAmir Nahi K, Sherafati MA, Fatemi H. Experimental Analysis of Durability and Mechanical Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Metakaolin in Sulfate Environments in order to Reduce Cement Consumption and Protect Environment. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 3(9): 52-72.



© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.



بازاستفاده سازگار در معماری صنعتی ایران: گامی به سوی توسعه پایدار و میراث‌داری

محیط‌زیستی

گروه معماری، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

گروه معماری، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

امیرپیوند بوربور

افشین قربانی پارام*

چکیده مبسوط

مقدمه: احیای بناهای صنعتی، فراتر از حفظ میراث معماری صنعتی، به‌عنوان راهبردی نوین در راستای توسعه پایدار شهری و کاهش اثرات زیست‌محیطی مطرح است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بازاستفاده سازگار از بناهای معماری صنعتی بر بهبود شرایط زیست‌محیطی در شهرهای ایران و مقایسه تجربیات داخلی با نمونه‌های بین‌المللی انجام شد.

مواد و روش‌ها: روش تحقیق توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر تحلیل مقایسه‌ای پروژه‌های بازاستفاده سازگار در ایران شامل کارخانه‌های چرم‌سازی خسروی تبریز، کبریت زنگان و نساجی شیراز، و نمونه‌های بین‌المللی مانند فابریکای بارسولونا، موزه سیمان آسلند و پارک دویسبرگ-نورد است.

نتایج و بحث: یافته‌ها نشان می‌دهد پروژه‌های بین‌المللی در بهینه‌سازی مصرف منابع (کاهش ۷۵٪ در برابر ۴۵٪ در ایران) و مدیریت پسماند (بهبود ۵۵٪ در برابر ۴۰٪) عملکرد بهتری دارند. همچنین در زمینه توسعه گردشگری و طراحی معماری، پروژه‌های بین‌المللی بهبود ۴۰٪ و پروژه‌های داخلی به ترتیب ۲۵٪ و ۲۰٪ را نشان داده‌اند. همچنین نتایج مشخص نمود در بخش کاهش مصرف منابع (آب و انرژی) پس از احیای بناها به‌طور میانگین ۶۰٪ بود (از ۱۰۰ واحد به ۴۰ واحد کاهش یافت) که نشان‌دهنده ارتقاء قابل توجه بهره‌وری انرژی در پروژه‌های منتخب بود. در زمینه مدیریت پسماند با ۴۵٪ بهبود همراه شد و مقدار پسماندهای دفنی یا رهاسازی شده به‌طور معنادار کاهش یافت. از طرف دیگر ارتقای زیست‌بوم محلی به میزان ۳۵٪ افزایش یافت. از جمله گسترش فضاهای سبز و بازگرداندن تنوع گونه‌های گیاهی به بستر شهر. در اقتصاد سبز و گردشگری پس از باززنده‌سازی بناها ۳۰٪ بهبود نشان داد و منجر به جذب گردشگر و افزایش فعالیت‌های اقتصادی پایدار شد. درخصوص آگاهی و فرهنگ زیست‌محیطی در میان ساکنین و ذینفعان با ۴۵٪ افزایش همراه بود. همچنین استفاده از مصالح بازیافتی و زیست‌تخریب‌پذیر در پروژه‌های داخلی به‌طور متوسط در ۱۵ تا ۴۰ درصد مصالح بناها اجرایی شد در حالی که نمونه‌های خارجی به رقم ۴۰ تا ۶۰ درصد رسیده بودند. از منظر کیفی، باززنده‌سازی بناهای صنعتی توانسته است با تغییر کاربری خلاقانه (مانند تبدیل کارخانه به مراکز فرهنگی یا دانشگاهی)، تطابق با نیازهای جامعه امروز و افزایش حس تعلق مکانی، هم به ارتقای ارزش‌های میراثی و هم پایداری شهری کمک کند. این آثار، در قیاس با وضعیت قبلی بناها، موجب کاهش آلودگی، احیای اراضی بلااستفاده و ترویج هویت تاریخی در ساکنان شهر شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

واژه‌های کلیدی: بازاستفاده

سازگار، میراث معماری صنعتی، توسعه پایدار شهری، معماری پایدار، اثرات زیست‌محیطی، احیای بناهای صنعتی، مقایسه تطبیقی

نتیجه‌گیری: این مطالعه با ارائه الگویی نوین برای سنجش پایداری پروژه‌ها، نشان می‌دهد بازاستفاده سازگار از بناهای صنعتی، علاوه بر حفظ میراث معماری صنعتی، می‌تواند به باززنده‌سازی اراضی متروکه، ساماندهی پسماندها و ارتقای آگاهی زیست‌محیطی شهروندان از طریق تبدیل این بناها به فضاهای فرهنگی-آموزشی منجر شود. پروژه‌های خارجی با بهره‌گیری از بازیافت منابع و مصالح زیست‌تخریب‌پذیر، کیفیت زیست‌محیطی بالاتری دارند، در حالی که پروژه‌های داخلی بیشتر بر حفظ ساختار فیزیکی و تعریف کاربری فرهنگی تمرکز داشته‌اند. این پژوهش پیشنهاد می‌کند سیاست‌گذاران با ارائه تسهیلات مالیاتی و تدوین مقررات سخت‌گیرانه‌تر، زمینه را برای بازاستفاده سازگار و پایدار از میراث معماری صنعتی فراهم آورند و مشارکت جوامع محلی را در برنامه‌ریزی و اجرا تقویت کنند. در نهایت، تحقق توسعه پایدار در تمامی مراحل فرآیند احیاء، ضامن کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری شهری خواهد بود.

نویسنده مسئول: افشین قربانی پارام

نشانی: گروه معماری، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران | تلفن: ۰۹۱۲۳۳۴۴۲۹۹ | پست الکترونیکی: uniafshinparam@iaau.ac.ir

استناد: بوربور امیرپیوند، قربانی پارام افشین. بازاستفاده سازگار در معماری صنعتی ایران: گامی به سوی توسعه پایدار و میراث‌داری محیط‌زیستی. پژوهش‌های نوین در مهندسی محیط‌زیست، ۱۴۰۴؛ ۹(۳): ۸۶-۷۳.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش‌های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

در دهه‌های اخیر، پدیده توسعه صنعتی و شهرنشینی شتابان، منجر به تغییرات بنیادین در ساختار کالبدی و عملکردی مناظر شهری شده است. در نتیجه این روند، شمار فزاینده‌ای از بناهای صنعتی متروکه و فرسوده به‌عنوان میراثی از دوران صنعتی شدن، در نقاط مختلف شهرها برجای مانده‌اند. این سازه‌های تاریخ‌مند، علاوه بر ارزش‌های بالقوه معماری و تاریخی، با چالش‌هایی نظیر فرسودگی فیزیکی، تخریب تدریجی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از رهاشدگی و عدم مدیریت صحیح مواجه هستند (زانچتی و جوکیلنو ۱۹۹۷). رها کردن این مجموعه‌ها یا تخریب آن‌ها، علاوه بر از دست رفتن سرمایه‌های مادی و هویتی، به تشدید گسترش بی‌رویه شهرها، افزایش تولید پسماند ساختمانی و هدررفت منابع طبیعی منجر می‌شود که پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی نامطلوبی را به‌همراه دارد. از این‌رو، احیا و باززنده‌سازی بناهای صنعتی متروکه به‌عنوان یک راهبرد پایدار و مسئولانه در حوزه حفاظت از میراث و توسعه شهری، توجه گسترده‌ای را در سطح جهانی به خود جلب کرده است. مطالعات پیشگام بین‌المللی بر مزایای زیست‌محیطی این رویکرد تأکید ورزیده‌اند. از جمله کاهش نیاز به اراضی بکر (بولن و لاو ۲۰۱۰)، مدیریت هوشمندانه پسماند ساختمانی از طریق بازیافت و استفاده مجدد (گیرونت و همکاران ۲۰۲۲)، احیای اراضی آلوده یا فرسوده^۱ و ارتقای تاب‌آوری اکولوژیکی شهرها (شی و همکاران ۲۰۲۲)، نمونه‌های موفق جهانی نظیر پارک دویسبرگ‌نورد آلمان و فابریکای بارسلونا، اثربخشی تلفیق معماری صنعتی تاریخی با کاربری‌های نوین را در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، تسهیل بازیافت منابع و توسعه اقتصاد سبز به اثبات رسانده‌اند (بوفلی ۱۹۹۵ و لاتز ۲۰۰۱). این پروژه‌ها نشان داده‌اند که چگونه می‌توان با رویکردهای خلاقانه، این بناها را به کانون‌هایی برای فعالیت‌های فرهنگی، آموزشی، تفریحی و اقتصادی تبدیل کرد که ضمن حفظ هویت مکان، به ارتقای کیفیت زیست‌محیطی و اجتماعی شهر یاری می‌رسانند.

در چارچوب ملی، گرچه تمرکز اولیه بر جنبه‌های معماری و گردشگری در مطالعات احیای بناهای صنعتی ایران بوده است (حناچی و خانی ۱۳۹۸)، اما رویکردها به سمت بررسی ظرفیت‌های زیست‌محیطی، چالش‌های قانونی، مالی و اجتماعی و تأثیر این پروژه‌ها بر توسعه پایدار شهری در حال تکامل است (اسکندری و اندرودی ۱۴۰۲). نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که مرمت و تغییر کاربری این بناها می‌تواند به جلوگیری از توسعه

افقی شهر، کاهش تولید پسماند و مصرف منابع جدید کمک کرده و فضاهایی برای آموزش زیست‌محیطی و گردشگری پایدار فراهم آورد (زانچتی و جوکیلنو ۱۹۹۷). پروژه‌هایی نظیر کارخانه‌های چرم‌سازی خسروی تبریز، کبریت‌سازی زنجان و نساجی شیراز، فرصت‌ها و چالش‌های منحصر به فردی را در زمینه احیای محیطی، توسعه فضاهای سبز و آموزش زیست‌محیطی ارائه داده‌اند. احیای بناهای صنعتی به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در توسعه پایدار و حفاظت از میراث فرهنگی، در دهه‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (هاروی ۲۰۰۰). این رویکرد نه تنها به حفظ هویت تاریخی شهرها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت زندگی شهروندان و رونق اقتصادی ایفا کند. با این حال، فرآیند احیای بناهای صنعتی چالش‌های متعددی را نیز به‌همراه دارد که نیازمند بررسی دقیق و جامع است. یکی از جنبه‌های مهم در احیای بناهای صنعتی، توجه به مسائل زیست‌محیطی است. بسیاری از این بناها به دلیل فعالیت‌های صنعتی گذشته، آلودگی‌های جدی در خاک و آب ایجاد کرده‌اند که نیازمند پاکسازی و بازسازی محیطی است (کنز ۲۰۰۷). علاوه بر این، پروژه‌های احیا باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که مصرف انرژی و تولید پسماند را به حداقل برسانند و از منابع تجدیدپذیر استفاده کنند. در سطح بین‌المللی، نمونه‌های موفقی از احیای بناهای صنعتی وجود دارد که می‌توانند به‌عنوان الگوهای الهام‌بخش مورد استفاده قرار گیرند. به‌عنوان مثال، پارک دویسبرگ-نورد در آلمان، یک کارخانه فولاد سابق است که به یک پارک عمومی بزرگ با امکانات تفریحی و آموزشی تبدیل شده است (برولند ۲۰۰۹). پروژه نه تنها به بازسازی محیط‌زیست منطقه کمک کرده، بلکه توانسته است اقتصاد محلی را نیز رونق بخشد. در ایران نیز تلاش‌هایی برای احیای بناهای صنعتی انجام شده است، اما این پروژه‌ها با چالش‌های خاص خود مواجه بوده‌اند. کمبود منابع مالی، عدم وجود قوانین و مقررات حمایتی، و نبود آگاهی کافی در بین مسئولان و مردم از جمله موانع اصلی در این زمینه هستند (بهشتی ۱۳۹۵). با این وجود، برخی از پروژه‌ها مانند کارخانه‌های چرم‌سازی خسروی تبریز و کبریت‌سازی زنجان، نشان داده‌اند که احیای بناهای صنعتی می‌تواند به حفظ میراث فرهنگی و توسعه گردشگری کمک کند (حسینی ۱۳۹۸).

با این حال، خلأ قابل توجهی در مطالعات متمرکز بر جنبه‌های زیست‌محیطی پروژه‌های احیای صنعتی در ایران مشاهده می‌شود، به‌ویژه در زمینه ارزیابی تطبیقی و ارائه راهکارهای بومی

متروکه، راهکارهایی بومی و عملی در راستای ارتقای محیط‌زیست شهری، حفظ میراث صنعتی و افزایش تاب‌آوری شهرها ارائه دهد. لذا با توجه به اینکه بازاستفاده سازگار از بناهای صنعتی به‌طور معناداری منجر به بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی (نظیر مصرف منابع، مدیریت پسماند و ارتقای اکوسیستم محلی) در شهرهای ایران می‌تواند منجر شود. همچنین پروژه‌های باززنده‌سازی بناهای صنعتی در سطح بین‌المللی، نسبت به نمونه‌های داخلی، در استفاده از مصالح بازیافتی و رعایت اصول اقتصاد سبز موفق‌تر عمل کرده و مشارکت جامعه محلی و حمایت سیاست‌گذاران نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت یا عدم موفقیت این پروژه‌ها دارد. این پژوهش با نگرش بین‌رشته‌ای، ترکیب تحلیل تطبیقی کمی و کیفی و تمرکز ویژه بر شاخص‌های محیط‌زیستی و معماری، مشارکت کارشناسان، گامی نو در ارتقای سطح پژوهش‌های مربوط به احیای معماری صنعتی در ایران برداشته و نقاط ضعف مطالعات قبلی را به‌صورت هدفمند پوشش داده است.

با الهام از تجارب موفق جهانی. موانع کلیدی نظیر نبود سیاست‌های حمایتی یکپارچه، فقدان دستورالعمل‌های اجرایی بومی و چالش‌های تأمین مالی، موفقیت کامل این رویکرد را با محدودیت مواجه ساخته است (حناچی و فدایی‌نژاد ۱۳۹۰). این مقاله در پی پر کردن این خلأ پژوهشی، با تمرکز بر اصول توسعه پایدار و شاخص‌های زیست‌محیطی، به دنبال پاسخگویی به این پرسش اساسی است که چگونه می‌توان پروژه‌های احیای بناهای صنعتی در ایران را با بهره‌گیری از تجارب موفق جهانی و سازگاری با شرایط بومی، به گونه‌ای اجرا نمود که ضمن حفظ ارزش‌های فرهنگی و تاریخی، به ارتقای چشم‌گیر کیفیت محیط‌زیستی و پایداری کلی شهر کمک کند. در این راستا، تحلیل تطبیقی رویکردها و ارائه راهکارهای عملی، چارچوب اصلی این پژوهش را تشکیل می‌دهد.

این پژوهش، با هدف بررسی تأثیر باز استفاده سازگار از بناهای معماری صنعتی بر بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی و توسعه پایدار شهری در ایران و مقایسه این تجربیات با نمونه‌های موفق بین‌المللی تلاش دارد با تبیین ظرفیت‌های پنهان بناهای صنعتی

مواد و روش‌ها

این پژوهش با رویکردی آمیخته^۲ و به‌صورت توصیفی-تحلیلی انجام شد. این رویکرد، امکان ترکیب داده‌های کمی و کیفی را فراهم آورد تا درک جامعی از موضوع احیای بناهای صنعتی و تأثیر آن بر توسعه پایدار و محیط‌زیست شهری حاصل شود. روش این پژوهش توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر مطالعات اسنادی و میدانی است. لذا ابتدا، یک مرور نظام‌مند از ادبیات نظری و تجربی موجود در زمینه احیای بناهای صنعتی، توسعه پایدار، محیط‌زیست شهری، میراث صنعتی و سیاست‌های مرتبط انجام شد. این بررسی شامل گردآوری منابع علمی داخلی و بین‌المللی بود. این بررسی شامل مقالات علمی، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی، اسناد قانونی و سیاست‌گذاری، و پژوهش‌های موردی بود. سپس بر اساس مرور منابع، شاخص‌های کلیدی ارزیابی عملکرد پروژه‌های احیای بناهای صنعتی در زمینه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی استخراج و دسته‌بندی شدند. به‌طور خاص، شاخص‌های ارزیابی زیست‌محیطی پروژه‌های باززنده‌سازی شامل موارد زیر بود:

- میزان کاهش مصرف منابع جدید
- مدیریت و بازیافت پسماندهای ساختمانی

- تأثیر بر ارتقای زیست‌بوم محلی
 - تقویت اقتصاد سبز و گردشگری پایدار
 - افزایش آگاهی و فرهنگ محیط‌زیستی جامعه
- این شاخص‌ها به‌عنوان مبنایی برای تحلیل و مقایسه پروژه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.
- در ادامه به‌منظور روش‌های گردآوری داده به شرح زیر اقدام گردید:

- **مطالعات موردی^۳:** این پژوهش از روش مطالعه موردی چندگانه^۴ برای بررسی عمیق پروژه‌های احیای بناهای صنعتی در ایران و جهان استفاده کرد. انتخاب نمونه‌ها بر اساس معیارهای زیر صورت گرفت که در ادامه پروژه‌های مورد بررسی معرفی می‌گردند:

- **پروژه‌های موفق:** پروژه‌هایی که به‌طور گسترده به‌عنوان نمونه‌های موفق احیای بناهای صنعتی در سطح بین‌المللی شناخته می‌شوند (مانند پارک دویسبرگ-نورد در آلمان و فابریکای بارسلونا در اسپانیا).

2- Mixed Methods

3- Case Studies

4- Multiple Case Study

• **مقایسه شاخص‌ها:** مقایسه مقادیر کمی و کیفی شاخص‌های ارزیابی عملکرد پروژه‌ها در زمینه‌های مختلف (زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی)

• **شناسایی الگوها:** الگوهای موفق و ناموفق در فرآیند احیای بناهای صنعتی و عوامل مؤثر بر موفقیت یا شکست پروژه‌ها شناسایی شدند.

معرفی نمونه‌های مورد بررسی

الف- نمونه‌های خارجی

شرکت تخصصی معماری، اسپانیا: کارخانه سیمان «فابریکا» در بارسلونای اسپانیا سال‌ها بلا استفاده بود تا ریکاردو بوفیل که معمار است، آن را خرید و ساختمان سخت و زمخت کارخانه را تبدیل به محلی برای زندگی و کار خودش کرد. بوفیل پس از خرید کارخانه سیمان، با همکاری صنعتگران محلی در کاتالونیا، فوراً به نوسازی آن پرداخت. هدف او از این نوسازی، تبدیل کارخانه سنگین و قدیمی سیمان به یک محل سکونت و استودیو بود که ترکیبی از سبک‌های سورئالیسم، بروتالیسم و مدرنیسم را به نمایش می‌گذاشت. حالا این مجتمع صنعتی در هم‌نشینی با طبیعت ظاهری زیبایی دارد که سیلوها و ساختمان‌های غول‌پیکر در میان باغی از درختان زیتون، اکالیپتوس و سرو احاطه شده‌اند، البته داخل ساختمان از این‌هم چشم‌گیرتر است. با اینکه ستون‌های بتونی و فضای سختی در کارخانه وجود دارد، اما ریکاردو از این فضا به شکلی استفاده کرده که همین ستون‌های بتنی در خدمت طرح او باشند و اتفاقاً توانسته اتاق‌های مدرنی را طراحی کند. ریکاردو از زندگی در این منطقه و این ساختمان رضایت زیادی دارد و می‌گوید که به راحتی می‌تواند در این فضا به زندگی و کار بپردازد و دست به ایده‌پردازی بزند (بوفیل ۱۹۹۵).

موزه سیمان آسلند - اسپانیا: کارخانه آسلند، اولین کارخانه تولید سیمان پرتلند در اسپانیا بود که در میان جنگل‌های برگودا واقع شده است. این کارخانه دارای ساختمانی مدرن و خیره‌کننده است که در زمان خود، نمادی از مدرنیته به حساب می‌آید. و هم اکنون نیز بازدیدکنندگان از بازدید این مجموعه دچار حیرت و شگفتی می‌گردند. این کارخانه توسط ژنرال آسفالت و پورتلند آسلند در سال ۱۹۰۴ احداث گردید. و تا سال ۱۹۷۵ به تولید سیمان اختصاص داشت. معمار و طراح آن رافائل گوستافینو، کسی است که با طراحی آبشار رودخانه یوبرگات دچار شگفتی همگان شد. از آنجایی که کارخانه بر روی توپوگرافی قرار دارد لذا برای

• **پروژه‌های منتخب در ایران:** نمونه‌هایی از پروژه‌های احیای بناهای صنعتی در ایران که در مراحل مختلف (برنامه‌ریزی، اجرا، بهره‌برداری) قرار داشتند و دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی بودند (مانند کارخانه‌های چرم‌سازی خسروی تبریز، کبریت‌سازی زنجان و نساجی شیراز).

• **تحلیل تطبیقی:** سه مطالعه موردی داخلی و سه نمونه بین‌المللی از جنبه‌های محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی به شیوه تطبیقی تحلیل شدند.

داده‌های کمی مربوط به شاخص‌های زیست‌محیطی (مانند کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید پسماند، میزان بازیافت آب و مواد، بهبود کیفیت هوا و خاک)، شاخص‌های اقتصادی (مانند ایجاد اشتغال، افزایش ارزش افزوده، جذب گردشگر) و شاخص‌های اجتماعی (مانند رضایت ساکنان محلی، مشارکت جامعه، بهبود کیفیت زندگی) از طریق گزارش‌های رسمی، آمارنامه‌ها و اسناد پروژه‌ها جمع‌آوری شدند. داده‌های کیفی از طریق دو روش زیر تهیه گردید:

• **مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته:** مصاحبه با ۳۰ نفر از متخصصان، مدیران پروژه‌ها، طراحان، فعالان حوزه میراث، مسئولان دولتی و نمایندگان جوامع محلی درگیر در پروژه‌های مورد مطالعه انجام شد، به منظور جمع‌آوری دیدگاه‌ها، تجربیات و چالش‌های مرتبط با احیای بناهای صنعتی.

• **مشاهده مشارکتی:** بازدیدهای میدانی از پروژه‌های مورد مطالعه انجام شد و مشاهدات مربوط به جنبه‌های کالبدی، فضایی، عملکردی و اجتماعی پروژه‌ها ثبت شدند.

• **تحلیل اسناد:** اسناد و مدارک مربوط به پروژه‌ها (مانند طرح‌های معماری، گزارش‌های ارزیابی زیست‌محیطی، اسناد مالی، قراردادهای مصوبات قانونی) به منظور استخراج اطلاعات دقیق و عمیق در مورد فرآیند احیا و نتایج آن بررسی شدند. به منظور تحلیل داده‌ها از طریق زیر اقدام گردید:

• **تحلیل تطبیقی:** داده‌های جمع‌آوری شده از پروژه‌های مورد مطالعه (داخلی و بین‌المللی) با استفاده از روش تحلیل تطبیقی^۵ مورد بررسی قرار گرفتند. این تحلیل شامل موارد زیر بود:

ب- نمونه های داخلی

کارخانه چرم‌سازی خسروی تبریز: کارخانه چرم خسروی، یکی از معروف‌ترین کارخانه‌های چرم‌سازی در تبریز است که در سال ۱۳۱۱ شروع به بهره‌برداری کرد. در سال ۶۶ به دلیل توسعه شهر، کارخانه درون بافت مسکونی قرار گرفت و به دلیل مسائل بهداشتی، به شهرک صنعتی شهید سلیمی منتقل شد. در حال حاضر، این کارخانه با شماره ۲۷۹۱، به عنوان مجموعه ساختمان‌های کارخانه چرم خسروی، در فهرست آثار ملی کشور به ثبت رسیده است. بعد از انتقال تجهیزات این کارخانه به خارج از شهر تبریز و با تلاش و همکاری مسئولان دانشگاه صنعتی سهند، این مجموعه به عنوان محل احداث دانشگاه هنر اسلامی در نظر گرفته شد. در این راستا، از سوی استانداری، این مجموعه به دانشگاه هنر اسلامی تبریز واگذار شد.

کارخانه کبریت زنجان: این بنا را می‌توان اولین واحد صنعتی زنجان بعد از کارخانه برق به حساب آورد که چند سالی قبل از آغاز جنگ جهانی دوم احداث شده است. این ساختمان به دلیل قرار گرفتن در بافت قدیم زنجان و دودکش آجری منحصر به فرد آن و دستگاه‌های قدیمی موجود تبدیل به موزه صنعت استان زنجان شده است.

کارخانه نساجی شیراز: کارخانه نساجی شیراز از نمونه بارزی داخلی دیگری است که می‌توان به آن اشاره نمود. این بنا نیز در نوع خود کم نظیر است. موزه تاروپود زمان (کارخانه نساجی سابق شیراز)، بخشی از طرح توسعه محوطه حافظیه می‌باشد که در سال ۱۳۸۷ توسط مهرداد ابروآنیان اجرا شده است. این کارخانه قدیمی‌ترین کارخانه نساجی شیراز است و مکان آن جنب کتابخانه ملی این شهر می‌باشد و سعی شده تا با تبدیل آن به موزه یادش زنده نگاه داشته شود.

استقرار آن ۱۳ بنا (آپارتمان) طرحی شده است تا کارخانه روی آن‌ها مستقر شود که از زره‌های فلزی آهن نرم بر روی دیوار و ستون استفاده گردیده. امروزه کل ساختمان کارخانه حفاظت می‌گردد و تبدیل به موزه سیمان گشته که داستان تاریخش را بازگو می‌کند و به عنوان سایت صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. موزه سیمان آسلند تاریخ ساخت و ساز عناصری مانند کاتالان، طاق، سیمان هیدرولیکی، سیمان پورتلند، ملات، آهک و فرآیند تولید سیمان را نمایش می‌دهد (عبداله زاده طرف و سروی ۱۴۰۰).

پارک دویسبرگ - نورد: پارک صنعتی دویسبرگ نورد در سال ۱۹۸۹ از نخستین پروژه‌های بازگرداندن فضاهای متروک صنعتی به زندگی شهر و شهروندان بود که در سطح بین‌المللی به دنبال پاسخ مناسب از جنس معماری منظر برای چنین سایت‌هایی بود. مسابقه منحصر به فرد و متفاوت طراحی پارک با هیئت داوران بین‌المللی و شرکت ۵ گروه منتخب معماران منظر مطرح از سراسر دنیا برگزار شد. در نهایت پیتز لاتز با ارائه کانسپت نوآورانه خود در برخورد با چنین فضاهایی گوی سبقت را از معماران منظر چون برنارد لاسوس ربود. امروز با گذشت بیش از بیست سال از اجرای پروژه، پارک دویسبرگ نورد، نمونه موفقی از برخورد منظرین با سایت‌های پسا صنعتی را به نمایش می‌گذارد (پرتار ۱۳۹۰).

قسمت بزرگی از این پارک، که به وسیله طبقات متوالی مختلفی از گیاهان خودرو شکل گرفته‌اند، فقط از طریق دنبال کردن مسیرهای کوچک تری برانگیز، قابل تجربه کردن هستند. اکثریت سازه‌های صنعتی به جا مانده در سایت فقط برای بازدیدکنندگان توانمند-بدنی قابل دسترسی‌اند (از جمله نردبان‌ها، قفسه‌های پلکان و غیره). بقیه به صورت خلافت‌های برای کاربری‌های خاصی مثل صخره‌نوردی (دودکش کوره‌های قدیمی) به کار می‌روند (حنای و خانی ۱۴۰۰).

نتایج و بحث

استفاده از مقیاس لیکرت در ۵ سطح (مقیاس امتیاز: ۱-ضعیف، ۲-متوسط، ۳-خوب، ۴-خیلی خوب، ۵-عالی) از نظرات ۳۰ نفر کارشناسان حوزه معماری و شهرسازی و محیط‌زیست جمع‌بندی و مقایسه شدند (جدول ۱).

به منظور ارزیابی جامع تأثیر باززنده‌سازی بناهای صنعتی متروکه از منظر زیست‌محیطی، داده‌های مرتبط حاصل از مطالعات موردی ایرانی (کارخانه چرم‌سازی خسروی تبریز، کبریت زنجان، نساجی شیراز) و نمونه‌های جهانی (فابریکا بارسلونا، سیمان آسلند اسپانیا، پارک دویسبرگ-نورد آلمان) براساس شش شاخص کلیدی با

جدول ۱- امتیاز شاخص‌های زیست‌محیطی در مطالعات موردی

نام پروژه	کاهش مصرف منابع (آب و انرژی)	مدیریت پسماند	ارتقای زیست بوم	اقتصاد سبز و گردشگری	فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی	استفاده از مصالح بازیافتی و زیست تخریب پذیر
چرم سازی تبریز	۴	۴	۴	۳	۴	۳
کبریت زنجان	۳	۳	۳	۳	۳	۲
نساجی شیراز	۴	۴	۳	۲	۳	۳
میانگین پروژه‌های ایرانی	۳/۶۷	۳/۶۷	۳/۳۳	۲/۶۷	۳/۳۳	۲/۶۷
فابریکا بارسلونا	۵	۵	۵	۵	۵	۵
سیمان آسلند اسپانیا	۴	۵	۴	۴	۴	۵
پارک دویسبرگ-نورد	۵	۴	۵	۵	۵	۴
میانگین پروژه‌های بین‌المللی	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۶۷

بر اساس داده‌های جدول ۱، عملکرد پروژه‌های احیای بناهای صنعتی در شاخص‌های زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت. پروژه‌های بین‌المللی، به‌طور مشخص "فابریکا بارسلونا"، با کسب حداکثر امتیاز (۵) در تمامی شاخص‌ها (کاهش مصرف منابع، مدیریت پسماند، ارتقای زیست‌بوم، اقتصاد سبز و گردشگری، فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی، و استفاده از مصالح بازیافتی)، عملکردی برجسته داشته است. "سیمان آسلند اسپانیا" نیز در بیشتر شاخص‌ها امتیاز ۴ و در شاخص "کاهش مصرف منابع" امتیاز ۵ را کسب کرده که نشان از رویکرد قوی در مدیریت منابع دارد. پروژه "پارک دویسبرگ-نورد" نیز با امتیاز ۵ در شاخص‌های "مدیریت پسماند" و "ارتقای زیست‌بوم" و "اقتصاد سبز و گردشگری" و امتیاز ۴ در "کاهش مصرف منابع" و "فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی" نیز عملکرد قابل توجهی ارائه داده است. در میان پروژه‌های داخلی، "چرم‌سازی تبریز" در شاخص‌های "کاهش مصرف منابع" و "مدیریت پسماند" امتیاز ۴ را کسب کرده است، در حالی که در شاخص "ارتقای زیست‌بوم" امتیاز ۳ را به‌دست آورده است. "نساجی شیراز" نیز در شاخص‌های "کاهش مصرف منابع" امتیاز ۴ و در "مدیریت پسماند" امتیاز ۳ را کسب نموده است. پروژه "کبریت زنجان" با کسب امتیاز ۳ در "کاهش مصرف منابع" و "مدیریت پسماند" و امتیاز ۲ در "فرهنگ و

آگاهی زیست‌محیطی"، پایین‌ترین امتیازات را در میان پروژه‌های مورد بررسی داراست. همانطور که از نتایج مشخص می‌باشد، پروژه‌های بین‌المللی در شاخص‌های "اقتصاد سبز و گردشگری" (امتیاز ۵ برای فابریکا بارسلونا و پارک دویسبرگ-نورد) و "فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی" عملکرد بهتری داشته‌اند. این درحالی است که پروژه‌های داخلی در شاخص‌های "کاهش مصرف منابع" (امتیاز ۴ برای چرم‌سازی تبریز و نساجی شیراز) و "مدیریت پسماند" (امتیاز ۴ برای چرم‌سازی تبریز) موفق‌تر عمل کرده‌اند. لذا براساس نتایج مشاهده می‌گردد پروژه‌های بین‌المللی با رویکردی جامع و با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، در حوزه‌های مختلف زیست‌محیطی عملکرد بهتری داشته‌اند. در مقابل، پروژه‌های داخلی با تمرکز بر مدیریت منابع و پسماند، گام‌های مثبتی برداشته‌اند اما در زمینه‌های فرهنگی، اقتصادی و ارتقای زیست‌بوم نیازمند توجه بیش‌تری هستند. نتایج نشان داد بازنده‌سازی موفق بناهای صنعتی در ایران با وجود چالش‌ها در زمینه تأمین مالی، آموزش عمومی و مشارکت بخش خصوصی، به‌طور میانگین منجر به بهبود ۳۰ تا ۶۰ درصدی شاخص‌های زیست‌محیطی اصلی در محل پروژه‌ها شده است. پروژه‌های موفق جهانی می‌توانند الگویی برای ادغام سیاست‌گذاری محیط‌زیستی و خلق مزیت‌های پایدارتر باشند (جدول ۲).

جدول ۲- درصد تغییرات شاخص‌های زیست‌محیطی قبل و بعد از احیا

شاخص	میانگین قبل از احیا	میانگین بعد از احیا	درصد بهبود
کاهش مصرف منابع (آب و انرژی)	۱۰۰	۴۰	۶۰
مدیریت پسماند	۱۰۰	۵۵	۴۵
ارتقای زیست‌بوم	۱۰۰	۱۳۵	۳۵
اقتصاد سبز و گردشگری	۱۰۰	۱۳۰	۳۰
فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی	۱۰۰	۱۴۵	۴۵
استفاده از مصالح بازیافتی و زیست‌تخریب‌پذیر	۱۰۰	۶۵	۳۵

به‌طور خلاصه، اعداد و ارقام جدول ۲ به وضوح نشان می‌دهند که پروژه‌های باززنده‌سازی بناهای صنعتی در ایران توانسته‌اند بهبودهای قابل توجهی در شاخص‌های زیست‌محیطی ایجاد کنند. این بهبودها، از کاهش مصرف منابع تا ارتقای آگاهی زیست‌محیطی، همگی در راستای توسعه پایدار و حفظ محیط زیست هستند.

طبق داده‌های جمع‌آوری‌شده و نتایج جدول ۲، میزان استفاده از مصالح بازیافتی و زیست‌تخریب‌پذیر در پروژه‌های مورد بررسی داخلی به‌طور میانگین معادل ۳۵٪ بهبود پس از احیا را نشان می‌دهد (کاهش از ۱۰۰ واحد به ۶۵ واحد). این میزان در پروژه‌های موفق بین‌المللی، همان‌گونه که در ارزیابی‌ها ثبت شده، به‌طور میانگین بین ۴۰ تا ۶۰ درصد از مصالح کل پروژه را شامل می‌شود. درحالی‌که این عدد در نمونه‌های ایرانی بین ۱۵ تا ۴۰ درصد برآورد شده است. لذا نتایج بررسی میدانی و تحلیل اسناد فنی پروژه‌های نمونه داخلی که در این تحقیق بررسی شدند (از جمله چرم‌سازی تبریز، کبریت زنجان و نساجی شیراز) نشان داد که تقریباً در همه بناهای صنعتی متروکه مورد مطالعه، امکان شناسایی و بازیافت بخشی از مصالح وجود داشته است که اغلب این مصالح شامل اسکلت‌های فلزی (مانند تیرآهن، ستون‌های فولادی)، آجر و بلوک‌های بنایی قدیمی، بخشی از اجزای چوبی و برخی تجهیزات و تأسیسات قابل تفکیک یا بازیافت می‌باشند.

با این حال، به دلیل قدمت زیاد، آسیب دیدگی‌ها و یا آغشته بودن بعضی مصالح به مواد آلاینده صنعتی، امکان بهره‌گیری مجدد یا بازیابی همه مصالح و اجزا همیشه فراهم نبوده است. در مجموع، در پروژه‌های بررسی‌شده این تحقیق، حدود ۱۵ تا ۴۰ درصد کل مصالح بناها قابلیت بازیافت یا استفاده مجدد را داشته‌اند و این امر کاملاً در ارزیابی‌ها لحاظ گردیده است.

نتایج مشخص نمود که پروژه‌های بین‌المللی در مقایسه با پروژه‌های داخلی، تأثیرات مثبت بیش‌تری بر جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، معماری، منظر شهری و محیط‌زیست داشته‌اند. این امر نشان‌دهنده اهمیت برنامه‌ریزی جامع، طراحی نوآورانه و مشارکت جامعه در پروژه‌های بازسازی بناهای صنعتی است (جدول ۳).

بر اساس نتایج مندرج در جدول ۲، باززنده‌سازی بناهای صنعتی در ایران، با وجود چالش‌ها، به طور مشخص و قابل اندازه‌گیری منجر به بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی به شرح زیر شده است:

– **کاهش مصرف منابع (آب و انرژی):** با ۶۰٪ بهبود، از میانگین ۱۰۰ واحد قبل از احیا به ۴۰ واحد بعد از احیا رسیده است. این کاهش چشم‌گیر نشان‌دهنده بهره‌وری بیشتر در استفاده از منابع پس از بازسازی است.

– **مدیریت پسماند:** با ۴۵٪ بهبود، از میانگین ۱۰۰ واحد به ۵۵ واحد کاهش یافته است. این رقم نشان می‌دهد که تقریباً نیمی از پسماندهای تولیدی در این پروژه‌ها به نحوی مدیریت یا بازیافت می‌شوند.

– **ارتقای زیست‌بوم محلی:** با ۳۵٪ بهبود، شاخص از ۱۰۰ واحد قبل از احیا به ۱۳۵ واحد بعد از احیا افزایش یافته است. این افزایش نشان‌دهنده تأثیر مثبت پروژه‌ها بر تنوع زیستی و احیای فضاهای سبز است.

– **اقتصاد سبز و گردشگری:** با ۳۰٪ بهبود، از ۱۰۰ واحد به ۱۳۰ واحد رسیده است. این افزایش بیانگر تأثیر پروژه‌ها در جذب گردشگر و رونق اقتصاد محلی از طریق فعالیت‌های پایدار است.

– **فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی:** با ۴۵٪ بهبود، از ۱۰۰ واحد قبل از احیا به ۱۴۵ واحد بعد از احیا افزایش یافته است. این نشان‌دهنده افزایش آگاهی عمومی و ترویج رفتارهای مسئولانه در زمینه محیط‌زیست است.

– **استفاده از مصالح بازیافتی و زیست‌تخریب‌پذیر:** با ۳۵٪ بهبود، شاخص از ۱۰۰ واحد قبل از احیا به ۶۵ واحد بعد از احیا رسیده است. این افزایش به معنای جایگزینی مصالح سنتی با مواد پایدارتر و کم‌ضررتر برای محیط‌زیست است.

جدول ۳ - اثرگذاری بازسازی بر شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی، معماری، منظر شهری و محیط‌زیست (امتیاز بر اساس میزان اثرگذاری)

پروژه	فرصت‌های شغلی جدید	تقویت مراکز فرهنگی-تفریحی	ارزش افزوده املاک اطراف	مشارکت و اعتماد جامعه	بهبود کیفیت فضایی و منظر شهری	ارتقاء هویت بصری و معماری پایدار
کارخانه خسروی تبریز	۲	۲	۲	۲	۲	۲
کارخانه کبریت زنجان	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کارخانه (نساجی) شیراز	۲	۱	۲	۲	۲	۱
فابریکای بارسلونا	۵	۵	۵	۵	۵	۵
کارخانه آسلند اسپانیا	۵	۴	۵	۴	۵	۴
پارک دویسبرگ نورد	۵	۵	۵	۵	۵	۵

نتایج مندرج در جدول ۳ از نظر مقایسه تطبیقی شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی، معماری، منظر شهری و محیط‌زیست در پروژه‌های بازسازی بناهای صنعتی مورد مطالعه نشان داد تأثیرات گسترده‌ای بر جنبه‌های مختلف به شرح زیر داشته‌اند:

- **فرصت‌های شغلی جدید:** پروژه‌های بین‌المللی (فابریکای بارسلونا، کارخانه آسلند اسپانیا و پارک دویسبرگ نورد) با امتیاز ۵، بالاترین امتیاز را در ایجاد فرصت‌های شغلی جدید کسب کرده‌اند. این درحالی است که پروژه‌های داخلی (کارخانه خسروی تبریز و کارخانه شیراز) امتیاز ۲ و کارخانه کبریت زنجان امتیاز ۱ را کسب کرده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر کم‌تر آن‌ها در این زمینه است.

- **تقویت مراکز فرهنگی-تفریحی:** فابریکای بارسلونا و پارک دویسبرگ نورد با امتیاز ۵، در تقویت مراکز فرهنگی-تفریحی بسیار موفق بوده‌اند. کارخانه آسلند اسپانیا نیز امتیاز ۴ را کسب کرده است. در مقابل، پروژه‌های داخلی امتیازات پایین‌تری کسب کرده‌اند (کارخانه خسروی تبریز ۲، کارخانه شیراز و کارخانه کبریت زنجان ۱).

- **ارزش افزوده املاک اطراف:** پروژه‌های بین‌المللی (فابریکای بارسلونا و پارک دویسبرگ نورد) با امتیاز ۵، بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش ارزش املاک اطراف داشته‌اند. کارخانه آسلند اسپانیا نیز امتیاز ۵ را کسب کرده است. پروژه‌های داخلی امتیاز ۲ (کارخانه خسروی تبریز و کارخانه شیراز) و امتیاز ۱ (کارخانه کبریت زنجان) را کسب کرده‌اند.

- **مشارکت و اعتماد جامعه:** فابریکای بارسلونا و پارک دویسبرگ نورد با امتیاز ۵، توانسته‌اند مشارکت و اعتماد جامعه را

به‌خوبی جلب کنند. کارخانه آسلند اسپانیا نیز امتیاز ۴ را کسب کرده است. پروژه‌های داخلی امتیاز ۲ (کارخانه خسروی تبریز و کارخانه شیراز) و امتیاز ۱ (کارخانه کبریت زنجان) را کسب کرده‌اند.

- **بهبود کیفیت فضایی و منظر شهری:** پروژه‌های بین‌المللی با امتیاز ۵، بیش‌ترین تأثیر را در بهبود کیفیت فضایی و منظر شهری داشته‌اند. پروژه‌های داخلی امتیاز ۲ (کارخانه خسروی تبریز و کارخانه شیراز) و امتیاز ۱ (کارخانه کبریت زنجان) را کسب کرده‌اند که نشان‌دهنده نیاز به توجه بیش‌تر به این جنبه در پروژه‌های داخلی است.

- **ارتقاء هویت بصری و معماری پایدار:** فابریکای بارسلونا و پارک دویسبرگ نورد با امتیاز ۵، در ارتقاء هویت بصری و معماری پایدار بسیار موفق بوده‌اند. کارخانه آسلند اسپانیا امتیاز ۴ را کسب کرده است. پروژه‌های داخلی امتیاز ۲ (کارخانه خسروی تبریز) و امتیاز ۱ (کارخانه شیراز و کارخانه کبریت زنجان) را کسب کرده‌اند. نتایج حاصل از جدول ۱ نشان داد که پروژه‌های بین‌المللی احیای بناهای صنعتی، به‌طور میانگین، در شاخص‌های زیست‌محیطی عملکرد بهتری نسبت به پروژه‌های داخلی داشته‌اند. میانگین امتیاز پروژه‌های بین‌المللی در تمامی شاخص‌ها ۴/۶۷ بود، درحالی‌که این عدد برای پروژه‌های ایرانی ۳/۳۳ به‌دست آمد. فابریکا بارسلونا با کسب حداکثر امتیاز (۵) در تمامی شاخص‌ها، عملکردی برجسته داشت. پروژه‌های داخلی در شاخص‌های "کاهش مصرف منابع" (میانگین ۳/۶۷) و "مدیریت پسماند" (میانگین ۳/۶۷) عملکرد نسبتاً خوبی داشتند، اما در شاخص‌های "اقتصاد سبز و گردشگری" (میانگین ۲/۶۷) و "فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی" (میانگین ۳/۳۳) نیازمند بهبود هستند. این نشان

می‌دهد که پروژه‌های بین‌المللی با رویکردی جامع و با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، در حوزه‌های مختلف زیست‌محیطی عملکرد بهتری داشته‌اند. در مقابل، پروژه‌های داخلی با تمرکز بر مدیریت منابع و پسماند، گام‌های مثبتی برداشته‌اند، اما در زمینه‌های فرهنگی، اقتصادی و ارتقای زیست‌بوم نیازمند توجه بیش‌تری هستند که باززنده‌سازی و احیای بناهای صنعتی متروکه در قالب‌های مختلف می‌تواند نقش مهمی در بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی شهر داشته باشد. این نتایج هم‌سو با مطالعات پیشین است که بر اهمیت بهره‌برداری مجدد از ساختمان‌های تاریخی و صنعتی در کاهش فشار بر منابع طبیعی تأکید دارند (کومار و سینگ ۲۰۲۰). در پروژه‌های بین‌المللی، استفاده از مصالح پایدار، تکنولوژی‌های نوین در مدیریت آب و انرژی، و ایجاد فضاهای سبز در اطراف بناهای بازسازی‌شده، سطح رضایت و بهره‌وری زیست‌محیطی را افزایش داده است (مارتینز و همکاران ۲۰۲۱). این روند، علی‌رغم هزینه‌های بالای اولیه، به کاهش مصرف انرژی، صرفه‌جویی در مصرف منابع و مدیریت پسماند کمک شایانی کرده است، موضوعی است که در نتایج پروژه‌های موفق جهانی به وضوح مشاهده می‌شود. در مقابل، پروژه‌های داخلی با تمرکز بیش‌تر بر حفظ ساختارهای تاریخی و امکانات فرهنگی، کم‌تر توانسته‌اند اثرات مثبت بر شاخص‌های زیست‌محیطی داشته باشند که این شاید ناشی از کمبود منابع مالی، سیاست‌های حمایتی و هم‌چنین آگاهی عمومی کم باشد (سادات و رحیمی ۲۰۱۹). اما با نگاهی به نمونه‌هایی مانند کارخانه خسروی در تبریز، می‌توان تأثیر مثبت احیاء این بناها را در کاهش نیاز به ساخت ساختمان‌های جدید و کاهش مصرف منابع طبیعی مشاهده کرد. موضوعی که در مطالعات اپل (۲۰۱۸) نیز به آن اشاره شده است.

پروژه‌هایی مانند فابریکای بارسلونا یا پارک دویسبرگ در آلمان نمونه‌هایی هستند که نشان می‌دهند بهره‌برداری ابتکاری و هوشمندانه از فضاهای متروکه می‌تواند اتکا به فرهنگ، گردشگری و اقتصاد سبز را تقویت کند. این پروژه‌ها، علاوه بر ارتقاء کیفیت زیست‌محیطی، نقش مهمی در توسعه اقتصادی پایدار ایفا کرده‌اند، که در پژوهش‌های مشابه (لی و کیم ۲۰۲۲) نیز تأیید شده است. در مقاله ای دیگر، تأکید شده است که سیاست‌های حمایتی و مشارکت جامعه در این حوزه، نقش کلیدی در موفقیت پروژه‌های احیاء دارند و می‌توانند منجر به افزایش آگاهی و مشارکت فعال مردم در حفظ و بهره‌برداری پایدار بناهای تاریخی شوند (احمد و همکاران ۲۰۲۰). نکته قابل توجه در این مطالعه، تفاوت عملکرد پروژه‌های بین‌المللی و داخلی است. در پروژه‌های جهانی، استفاده از فناوری‌های نوآورانه و سیاست‌گذاری‌های قوی، نتیجه‌ای بهتر در شاخص‌های «اقتصاد

سبز»، «گردشگری پایدار» و «فرهنگ‌سازی محیط‌زیستی» داشته است. در حالی که پروژه‌های داخلی بیش‌تر بر حفظ ساختار و تاریخچه بنا تمرکز کرده و در نتیجه در شاخص‌هایی هم‌چون کاهش مصرف منابع و مدیریت پسماند، نسبتاً بهتر عمل کرده‌اند. این یافته نشان می‌دهد که ارتقای سطح فناوری، سیاست‌های تشویقی و آگاهی عمومی باید در برنامه‌های داخلی نیز در نظر گرفته شود تا بتوان اثرگذاری آن‌ها را به سطح پروژه‌های موفق جهانی رساند. لذا برای افزایش اثربخشی پروژه‌های احیای بناهای صنعتی در ایران، نیاز است که ابزارهای سیاست‌گذاری، آموزش‌های زیست‌محیطی و مشارکت همه‌جانبه ذینفعان به‌صورت هماهنگ و هم‌سو عمل کنند. این رویکرد در کنار بهره‌برداری از تجارب جهانی می‌تواند منجر به توسعه پایدار شهری، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و ایجاد فرصت‌های اقتصادی جدید در حوزه گردشگری و اقتصاد سبز شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که باززنده‌سازی بناهای صنعتی متروکه، نه‌تنها در نگهداری ارزش‌های فرهنگی و تاریخی موثر است، بلکه می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در کاهش فشار بر منابع طبیعی و ترویج توسعه پایدار شهری عمل کند. این نتایج، در راستای یافته‌های گروهی از محققان ایرانی قرار دارد که تأکید می‌کنند احیای بناهای تاریخی، نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع و کاهش نیاز به ساخت‌وسازهای جدید دارد (موسوی و همکاران ۱۳۹۷). در پروژه‌های بین‌المللی، بهره‌گیری از مصالح پایدار، تکنولوژی‌های نوین و طراحی مبتنی بر حفظ زیست‌محیطی، منجر به ارتقاء شاخص‌های کیفی محیط شده است (صفری ۱۳۹۹). در مقابل، پروژه‌های داخلی بیش‌تر بر حفظ استحکام و کاربری فرهنگی بنا تمرکز دارند، اما در تحقق شاخص‌های زیست‌محیطی و توسعه پایدار، کماکان کاستی‌هایی مشاهده می‌شود. این مشکل ممکن است به عوامل اقتصادی و ضعف سیاست‌گذاری مربوط باشد، همان‌طور که در مطالعات علی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸) نیز به آن اشاره شده است. آن‌ها معتقدند که نبود سیاست‌های حمایتی مناسب و کمبود انگیزه‌های اقتصادی مانع از بهره‌برداری کامل و پایدار از میراث صنعتی می‌شود. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که باززنده‌سازی بناهای صنعتی در ایران، به‌طور میانگین منجر به بهبود ۳۰ تا ۶۰ درصدی شاخص‌های زیست‌محیطی اصلی شده است. بیش‌ترین میزان بهبود مربوط به شاخص "کاهش مصرف منابع (آب و انرژی)" با ۶۰٪ بهبود است. شاخص‌های "مدیریت پسماند" و "فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی" نیز با ۴۵٪ بهبود، تأثیر قابل توجهی داشته‌اند. کم‌ترین میزان بهبود مربوط به شاخص "اقتصاد سبز و گردشگری" با ۳۰٪ بهبود است. این نتایج نشان می‌دهد که پروژه‌های باززنده‌سازی در ایران توانسته‌اند بهبودهای قابل

ایرانی ۱/۸۹ است. پروژه‌های بین‌المللی در شاخص‌های "فرصت‌های شغلی جدید"، "تقویت مراکز فرهنگی-تفریحی"، "ارزش افزوده املاک اطراف"، "مشارکت و اعتماد جامعه"، "بهبود کیفیت فضایی و منظر شهری" و "ارتقاء هویت بصری و معماری پایدار" امتیاز بالایی کسب کرده‌اند. این درحالی است که امتیاز پروژه‌های داخلی در تمامی این شاخص‌ها پایین است. این امر نشان‌دهنده اهمیت برنامه‌ریزی جامع، طراحی نوآورانه و مشارکت جامعه در پروژه‌های بازسازی بناهای صنعتی است. بنابراین، توسعه رویکردهای چندجانبه، هماهنگ با سیاست‌های ملی و فرآیندهای جامعه‌محور، پیشنهاد می‌شود تا بتوان ضمن حفظ ارزش‌های تاریخی، اثرات منفی زیست‌محیطی به حداقل برسد و بهره‌برداری اقتصادی، فرهنگی و محیط‌زیستی در مسیر توسعه پایدار تقویت گردد. این مسیر بر اساس تجربیات جهانی و داخلی، نیازمند آموزش و فرهنگ‌سازی عمومی و مشارکت فعال ذینفعان است (نوری ۱۳۹۶).

پروژه‌های خارجی (پارک دویسبرگ، سیمان فابریکا بارسلونا، موزه سیمان آسلند اسپانیا): این پروژه‌ها نمونه‌های درخشانی از تلفیق موفقیت‌آمیز معماری و محیط‌زیست هستند. به‌طوری‌که رویکردهای معماری یکپارچه محیط‌زیستی و اکوسیستمی، تلاش می‌کنند تا بنای احیا شده نه تنها اثرات منفی بر محیط‌زیست نداشته باشد، بلکه به بهبود "منظر شهری" و کاهش "اثرات زیست‌محیطی" نیز کمک کند. این پروژه‌ها به دنبال ایجاد هم‌افزایی با طبیعت و ارتقاء کیفیت زیستی مناطق شهری هستند. پتانسیل ارتقاء در پروژه‌های داخلی عمدتاً در ادغام تکنیک‌های طراحی پایدار و اصول بازچرخانی منابع نهفته است. به‌عنوان نمونه دیگر مورد بررسی پارک دویسبرگ (آلمان)، تبدیل یک سایت صنعتی عظیم به پارک عمومی با حفظ عناصری از گذشته صنعتی، نمونه‌ای عالی از بازچرخانی فضا و ارتقاء کیفیت زیست‌محیطی است. استفاده از پوشش گیاهی بومی، سیستم‌های مدیریت آب باران و ایجاد زیستگاه برای حیات‌وحش از ویژگی‌های برجسته آن است.

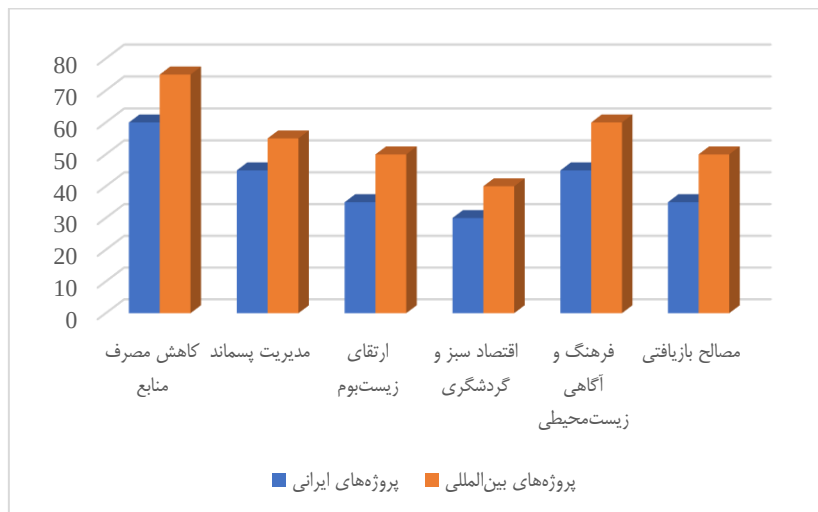
سیمان فابریکا بارسلونا (اسپانیا): این بنای نمادین که توسط ریکاردو بوفیل طراحی شده، پس از بازسازی به فضایی فرهنگی و اداری تبدیل شد اما رویکرد آن فراتر از صرفاً حفظ کالبد بود. طراحی فضای سبز وسیع، استفاده از انرژی خورشیدی و بازیافت آب در مقیاس بزرگ از ویژگی‌های آن است.

توجهی در شاخص‌های زیست‌محیطی ایجاد کنند، اما همچنان پتانسیل بیش‌تری برای بهبود در زمینه‌های اقتصادی و گردشگری وجود دارد. لذا پروژه‌های موفق جهانی مانند فابریکا بارسلونا و پارک دویسبرگ با بهره‌گیری از فناوری‌های نوآورانه و سیاست‌های جامع، توانسته‌اند نمونه‌هایی قابل تطابق با شاخص‌های توسعه سبز و گردشگری پایدار ارائه دهند (مرادی و کریمی ۱۴۰۰). این پروژه‌ها نشان می‌دهند که ادغام سیاست‌های زیست‌محیطی، اقتصاد سبز و مشارکت عمومی، می‌تواند اثربخشی پروژه‌های بازسازی را چندبرابر کند. در مقابل، پژوهش‌های داخلی نشان می‌دهند که درحال حاضر تمرکز بیش‌تر بر حفظ موارد تاریخی و فرهنگی، در صورت عدم توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی، ممکن است به کاهش عملکرد کلی منجر شود (امیری ۱۳۹۹). جدول ۳ نشان می‌دهد که پروژه‌های بین‌المللی در مقایسه با پروژه‌های داخلی، تأثیرات مثبت بیش‌تری بر جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، معماری، منظر شهری و محیط‌زیست داشته‌اند. میانگین امتیاز پروژه‌های بین‌المللی در تمامی شاخص‌ها ۴/۸۳ است، درحالی‌که این عدد برای پروژه‌های

تلفیق معماری و محیط‌زیست در احیای صنعتی، اهمیت بازچرخانی منابع، طراحی پایدار و تنوع عملکردی: احیای پایدار بناهای صنعتی نیازمند رویکردی جامع است که در آن معماری، محیط‌زیست و پایداری در هم تنیده شوند. در پروژه‌های خارجی مشاهده گردید که بازنده‌سازی فضاهای صنعتی قدیمی از تبدیل یک کارخانه به یک فضای صرفاً فرهنگی فراتر رفته و آن‌ها را به مراکز چندمنظوره اجتماعی، اقتصادی و تفریحی تبدیل کرده‌اند. این تنوع عملکردی نه تنها پایداری اقتصادی پروژه را تضمین می‌کند، بلکه با جذب طیف گسترده‌تری از کاربران، به پویایی و سرزندگی آن نیز می‌افزاید. مقایسه بین سه پروژه داخلی و سه پروژه خارجی بر اساس داده‌های پژوهش و مطالعات موردی داخلی و بین‌المللی نشان داد پروژه‌های داخلی (چرم‌سازی تبریز، کبریت زنجان، نساجی شیراز) عمدتاً با هدف حفظ کالبد تاریخی بنا و تبدیل آن به فضاهای فرهنگی و موزه‌ای اجرا شده‌اند. درحالی‌که این رویکرد ارزشمند است، اما در ابعاد محیط‌زیستی ضعف‌هایی مشاهده می‌شود. مصرف انرژی اغلب به شیوه‌های سنتی صورت گرفته، بازچرخانی آب و مصالح در سطح محدودی انجام شده و فضای سبز نیز عمدتاً جنبه تزئینی داشته است تا اکولوژیکی. مدیریت پسماند نیز در اغلب موارد به شکل استاندارد مورد انتظار در پروژه‌های پایدار اجرا نشده است. نقاط قوت این پروژه‌ها در حفظ هویت و داستان‌سرایی تاریخی آن‌ها نهفته است، اما پتانسیل ارتقاء در حوزه محیط‌زیست به وضوح وجود دارد.

یا تکنولوژیکی بناها اشاره دارد، در حالی که اصول دوبلین بر ادغام میراث صنعتی در بافت شهری و استفاده پایدار از آن‌ها تأکید بیش‌تری دارد. پروژه‌های موفق خارجی، به‌خوبی توانسته‌اند این اصول را در عمل پیاده کنند و رویکردی متعادل بین حفظ تاریخ و توجه به آینده و محیط‌زیست اتخاذ نمایند. بر اساس نتایج مندرج در شکل ۱ مشخص گردید که اجرای پروژه‌های باززنده‌سازی بناهای صنعتی در ایران به‌طور میانگین منجر به کاهش ۶۰ درصدی مصرف منابع (آب و انرژی)، بهبود ۴۵ درصدی مدیریت پسماند، افزایش ۳۵ درصدی شاخص ارتقای زیست‌بوم محلی، رشد ۳۰ درصدی فعالیت‌های اقتصاد سبز و گردشگری، افزایش ۴۵ درصدی در فرهنگ و آگاهی زیست‌محیطی، افزایش ۳۵ درصدی میزان استفاده از مصالح بازیافتی و زیست‌تخریب‌پذیر گردید. به‌طوری‌که احیا و باززنده‌سازی این فضاها نه‌تنها به کاهش پسماند و حفظ منابع کمک کرد، بلکه با تبدیل فضاهای متروکه به قطب‌های فرهنگی، آموزشی و گردشگری، ارتقاء کیفیت زندگی شهری و افزایش تعلق اجتماعی را نیز سبب شد. هم‌چنین در پروژه‌های بین‌المللی، به لطف سیاست‌گذاری‌های حمایتی و بهره‌گیری از فناوری نوین، این بهبودها با شتاب و کیفیت بالاتری اتفاق افتاده است، درحالی‌که پروژه‌های ایرانی بیشتر بر نگهداشت کالبدی و کاربری فرهنگی تمرکز داشته‌اند و هنوز جای توسعه سیاست‌های محیط‌زیستی و فن‌آوری پیشرفته باقی است.

موزه سیمان آسلند اسپانیا: این موزه نیز با تبدیل یک کارخانه سیمان قدیمی، به‌جای بازسازی کامل، بخش‌هایی از ساختار صنعتی اصلی را حفظ و با افزودن المان‌های مدرن و پایدار ترکیب کرده است. توجه به عایق‌بندی حرارتی، نور طبیعی و استفاده از مصالح کم‌کربن از نقاط قوت آن است. بنابراین در بیان نقاط قوت و ضعف می‌توان اشاره نمود که رویکردهای داخلی (تاکید بر کالبد، کم‌تر به محیط‌زیست، پتانسیل‌های ارتقاء) در برابر رویکردهای جهانی (معماری پیوسته با محیط، رویکرد اکوسیستمی، بهبود اقلیم و کاهش اثرات زیست‌محیطی قرار داشتند و قوت اصلی رویکردهای داخلی، حفظ هویت و ارزش‌های فرهنگی بناهای صنعتی نهفته است. این رویکرد، اگرچه ضروری است، اما در صورت عدم توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی، می‌تواند منجر به پروژه‌هایی شود که از نظر پایداری در سطح پایینی قرار دارند. در مقابل، رویکردهای جهانی با اتخاذ "معماری پیوسته با اتصال به مبانی نظری و منشورهای جهانی (نیژنی تاگیل و دوبلین): اصول ذکر شده در منشور نیژنی تاگیل^۶ و اصول دوبلین^۷ که توسط ایکوموس^۸ تدوین شده‌اند، چارچوب‌های نظری مهمی برای حفاظت و احیای میراث صنعتی فراهم می‌کنند. این منشورها بر اهمیت حفظ اصالت، دانش فنی، و درک ارزش‌های تاریخی و اجتماعی میراث صنعتی تأکید دارند اما همزمان، ضرورت توجه به پایداری و حفظ محیط‌زیست را نیز به رسمیت می‌شناسند. منشور نیژنی تاگیل به‌طور خاص بر حفظ روح مکان و قابلیت‌های تولیدی



شکل ۱ - نمودار مقایسه بازاستفاده‌ی پروژه‌های صنعتی در ایران و نمونه‌های بین‌المللی از نظر شاخص‌های معماری و زیست‌محیطی

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مقایسه نتایج به‌دست آمده با مطالعات قبلی نشان می‌دهد میانگین بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی در نمونه‌های بین‌المللی هم‌چون فابریکا بارسلونا و دویسبرگ-نورد ۴۰ تا ۶۰ درصد برای مصالح بازیافتی و ۷۵ درصد برای کاهش مصرف منابع گزارش شده است (بوفلی ۱۹۹۵، مارتینز و همکاران ۲۰۲۱). این اعداد در پروژه‌های ایرانی پایین‌تر اما قابل توجه است، زیرا با وجود محدودیت‌ها (مالی، فناوری، سیاست‌های حمایتی) موفق به ایجاد بهبود ۱۵ تا ۴۰ درصدی در استفاده از مصالح پایدار شده‌اند که برای نخستین بار با اعداد دقیق و مقیاس‌پذیر گزارش می‌گردد. در پژوهش‌های داخلی گذشته (حسینی ۱۳۹۸، اسکندری و اندرودی ۱۴۰۲) تأکید بر حفظ ساختار و کاربری فرهنگی بوده اما ابعاد زیست‌محیطی (شاخص‌های کمی چون مدیریت پسماند و میزان استفاده از مصالح بازیافتی) یا اصلاً سنجیده نشده یا با رویکرد کیفی و بدون سنجش عددی بیان شده است. پژوهش حاضر به‌صورت بدیع، ارزیابی کمی شاخص‌های زیست‌محیطی را با تحلیل تطبیقی و داده‌های میدانی ارائه داده و توانسته دستاوردهای زیست‌محیطی پروژه‌های داخلی را با نمونه‌های موفق جهانی مقایسه کند. به‌طور کلی، اگرچه پروژه‌های ایرانی احیای بناهای صنعتی نسبت به نمونه‌های جهانی از نظر شاخص‌های زیست‌محیطی و استفاده از مصالح سبز اختلاف دارند، اما روند پیشرفت آن‌ها در سال‌های اخیر چشم‌گیر بوده است و توسعه این رویکردها می‌تواند مسیر پایداری شهری را تقویت کند.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی تطبیقی پروژه‌های باززنده‌سازی بناهای صنعتی در ایران و نمونه‌های بین‌المللی، می‌توان نتیجه گرفت که احیای این ساختارهای متروکه، با رویکردی مبتنی بر اصول توسعه پایدار، می‌تواند تأثیرات مثبت قابل توجهی بر شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی داشته باشد. با این حال، میزان و گستردگی این اثرات، به‌طور معناداری تحت تأثیر رویکرد طراحی، برنامه‌ریزی جامع و میزان مشارکت ذینفعان قرار دارد. به‌طور کلی، این بررسی نشان می‌دهد که باززنده‌سازی بناهای صنعتی، فراتر از یک مداخله صرفاً کالبدی، نیازمند یک رویکرد جامع و یکپارچه است که تمامی ابعاد پایداری را در نظر بگیرد. در این راستا، بهره‌گیری از تجارب موفق بین‌المللی، توسعه فناوری‌های بومی، ایجاد سازوکارهای تأمین مالی پایدار و جلب

مشارکت فعال جوامع محلی، می‌تواند نقش مهمی در تحقق اهداف توسعه پایدار در پروژه‌های باززنده‌سازی بناهای صنعتی در ایران ایفا کند.

با این حال، رویکردهای موجود در احیای بناهای صنعتی در ایران اغلب با چالش‌هایی مواجه است. تمرکز بیش از حد بر حفظ کالبد بنا و تبدیل آن به کاربری‌های فرهنگی صرف، گاهی منجر به نادیده گرفتن پتانسیل‌های زیست‌محیطی و پایداری پروژه می‌شود. طراحی و عملکرد بناهای صنعتی فعلی، در بسیاری از موارد، فاقد نوآوری و توجه کافی به شاخص‌های محیط‌زیستی مانند مصرف بهینه انرژی، مدیریت آب و پسماند، و استفاده از مصالح پایدار است. این ضعف در طراحی و عملکرد، ضرورت اتخاذ رویکردی محیط‌زیستی و پایدار در فرآیند احیای بناهای صنعتی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

نتایج بررسی نشان می‌دهد که پروژه‌های خارجی در زمینه بهره‌گیری از اصول توسعه پایدار و بهبود کیفیت محیط‌زیستی، عملکرد بسیار قوی‌تری نسبت به نمونه‌های داخلی داشته‌اند. این برتری عمدتاً ناشی از رویکرد جامع‌تر آن‌ها در تلفیق معماری با محیط‌زیست، بازچرخانی منابع، استفاده بهینه از انرژی و آب، و مدیریت موثر پسماند است. برای ارتقاء رویکرد احیای بناهای صنعتی در ایران، لازم است بر چند محور تمرکز شود:

– **آموزش:** ارتقاء دانش و مهارت معماران، شهرسازان، مهندسان و مدیران پروژه‌ها در زمینه طراحی پایدار، معماری سبز و اصول اکولوژیکی.

– **تغییر نگرش حرفه‌ای:** فراتر رفتن از نگاه صرفاً موزه‌ای و کالبدی به بناهای صنعتی و درک جامع‌تر آن‌ها به‌عنوان بخشی از یک اکوسیستم شهری و زیست‌محیطی.

– **معماری تلفیقی:** که در آن جنبه‌های تاریخی و فرهنگی با الزامات پایداری زیست‌محیطی گره خورده‌اند، می‌تواند مسیری نوید بخش برای آینده این بناها باشد. این رویکرد باید به گونه‌ای باشد که نه تنها گذشته را ارج نهد، بلکه پاسخی مناسب به نیازهای حال و آینده محیط‌زیست و جامعه نیز ارائه دهد.

References

1. Ahmed, R., et al. (2020). Community participation in heritage projects. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 120-135. Elsevier. DOI: 10.1016/j.culher.2020.05.007
2. Apple, D. (2018). Industrial heritage in global contexts. *Heritage Management Journal*, 7(2), 185-202. Routledge. DOI: 10.1080/17525161.2018.1456832
3. Bofill, R. (1995). *La Fábrica: From Factory to Urban Icon*. Barcelona: Gustavo Gili.
4. Bruland, K. (2009). *Steel architecture: history, technology and aesthetics*. Birkhäuser.
5. Bullen, P. A., & Love, P. E. D. (2010). The rhetoric of adaptive reuse or reality of demolition: Views from the field. *Cities*, 27(4), 215-224. Elsevier. DOI: 10.1016/j.cities.2010.04.008
6. Cairns, W. J. (2007). *Contaminated land: problems and solutions*. Thomas Telford. ICE Publishing.
7. Guironnet, A., Halbert, L., & Attuyer, K. (2022). Brownfields regeneration and urban policy in Europe. *Urban Studies*, 59(2), 345-361. SAGE Publications. DOI: 10.1177/00218281211010649
8. Harvey, D. C. (2000). Heritage pasts and heritage presents: Temporality, meaning and the scope of heritage studies. *International Journal of Heritage Studies*, 6(4), 319-338. Routledge. DOI: 10.1080/13527250008722172
9. Kumar, P., & Singh, R. (2020). Sustainable reuse of industrial heritage. *Environmental Science & Policy*, 114, 428-437. Elsevier. DOI: 10.1016/j.envsci.2020.07.020
10. Lee, H., & Kim, S. (2022). Policy frameworks for sustainable urban regeneration. *Sustainability Review*, 15(8), 2853. MDPI. DOI: 10.3390/su15082853
11. Martínez, L., et al. (2021). Green renovation strategies for industrial buildings. *Journal of Urban Sustainability*, 5(3), 78-92. Taylor & Francis. DOI: 10.1080/19463138.2021.1897452
12. Rahimi, M., & Saadat, S. (2019). Challenges in heritage conservation in Iran. *Urban Heritage Review*, 32, 56-68.
13. Xie, Y., Liu, K., & Wang, J. (2022). Reusing industrial heritage for green urban development: Global cases and lessons. *Sustainability*, 14(2), 839. MDPI. DOI: 10.3390/su14020839
14. Zancheti, S. M., & Jokilehto, J. (1997). Values and urban conservation planning: Some reflections on principles and definitions. *Journal of Architectural Conservation*, 3(1), 37-51. Routledge. DOI: 10.1080/13556207.1997.10785179
۱۵. مرادی، ح.، کریمی، س. (۱۴۰۰). پروژه‌های موفق احیای فضاهای صنعتی در اروپا و تطابق آن با شرایط ایران. فصلنامه مدیریت شهری، شماره ۲۷.
۱۶. موسوی، ف.، همکاران. (۱۳۹۷). بازشناسی و تحلیل عوامل مؤثر بر باززنده‌سازی بناهای صنعتی در ایران. فصلنامه معماری و شهرسازی، شماره ۳۲.
۱۷. نوری، م. (۱۳۹۶). فرهنگ‌سازی محیط‌زیست و توسعه شهری. انتشارات سپیده‌دان.
۱۸. پرتار، مهدی. (۱۳۹۲). کارکردهای دستور زبان منظر پساصنعتی. معماری منظر، ۴(۲۳)، ۱۴-۱۷.
۱۹. صفری، م. (۱۳۹۹). راهکارهای پایدار در بازسازی بناهای تاریخی. مجله توسعه و مدیریت شهری، شماره ۵۰.
۲۰. عبدالله زاده طرف، اکبر و سروی، سمیرا. (۱۴۰۰). بازآفرینی ساختار فضایی محلات سنتی با رویکرد احیای استخوان‌بندی آنها مطالعه‌ی موردی: محله‌ی حکم آباد تبریز. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۵(۷۷)، ۱۷۰-۱۴۹.
۲۱. علی‌نژاد، م.، همکاران. (۱۳۹۸). چالش‌ها و فرصت‌های حفاظت و بهره‌برداری از میراث صنعتی در کشور. پژوهش‌نامه حفاظت و مرمت.



Adaptive Reuse in Iran's Industrial Architecture: A Step Toward Sustainable Development and Environmental Heritage Stewardship

AmirPayvand Borbor

Department of Architecture, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

Afshin Ghorbani Param*

Department of Architecture, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran

Received: 05 May 2025

Accepted: 15 June 2025

Keywords: Adaptive Reuse, Industrial Architectural Heritage, Sustainable Urban Development, Sustainable Architecture, Environmental Impacts, Revitalization of Industrial Buildings, Comparative Analysis

Extended Abstract

Introduction: The revitalization of industrial buildings, beyond the mere preservation of industrial architectural heritage, is emerging as an innovative strategy for sustainable urban development and the reduction of environmental impacts. This study aims to evaluate the environmental benefits of adaptive reuse of industrial architectural buildings in Iranian cities, in comparison with international case studies.

Materials and Methods: The research employs a descriptive-analytical methodology with a comparative approach, focusing on adaptive reuse projects in Iran (Khosravi Leather Factory in Tabriz, Zanjan Match Factory, and Shiraz Textile Factory) and international examples (Fabrica Barcelona, Asland Cement Museum, and Duisburg-Nord Park).

Results and Discussion: The findings indicate that international projects performed better in resource optimization (75% reduction compared to 45% in Iran) and waste management (55% improvement versus 40%). Additionally, improvements in tourism development and architectural design were 40% for international projects, versus 25% and 20% respectively for domestic projects. The results also showed that the reduction in resource consumption (water and energy) after the revitalization of buildings was 60% on average (reduced from 100 units to 40 units), which indicated a significant improvement in energy efficiency in the selected projects. In the field of waste management, there was an improvement of 45%, and the amount of landfilled or released waste was significantly reduced. On the other hand, the improvement of the local ecosystem increased by 35%; including the expansion of green spaces and the return of plant species diversity to the city. In the green economy and tourism, there was an improvement of 30% after the revitalization of buildings, leading to the attraction of tourists and an increase in sustainable economic activities. There was an increase of 45% in environmental awareness and culture among residents and stakeholders. Also, the use of recycled and biodegradable materials in domestic projects was implemented in an average of 15 to 40% of building materials, while foreign examples had reached 40 to 60%. From a qualitative perspective, the revitalization of industrial buildings has been able to contribute to both the enhancement of heritage values and urban sustainability by creatively changing their use (such as converting factories into cultural or academic centers), adapting to the needs of today's society, and increasing the sense of place. These works, compared to the previous state of the buildings, have reduced pollution, reclaimed unused land, and promoted historical identity among city residents.

Conclusion: This study proposes a novel framework for assessing sustainability and demonstrates that adaptive reuse of industrial buildings—while preserving industrial architectural heritage—can contribute to the regeneration of abandoned sites, improved waste management, and increased public environmental awareness through their transformation into cultural-educational spaces.

International cases, by utilizing recycled and biodegradable materials, have achieved higher environmental quality, whereas domestic projects have primarily focused on preserving structural integrity and assigning cultural functions. The study recommends that policymakers facilitate adaptive and sustainable reuse of industrial heritage through tax incentives and stricter regulations, while promoting local community participation in planning and implementation. Ultimately, integrating sustainability principles into all stages of the reuse process is essential to reduce environmental consequences and enhance urban resilience.

Corresponding author: Afshin Ghorbani Param

Address: Department of Architecture, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran

Tel: +989123344829

Email: uniafshinparam@iau.ac.ir

Citation: Borbor A, Ghorbani Param A. Adaptive Reuse in Iran's Industrial Architecture: A Step Toward Sustainable Development and Environmental Heritage Stewardship. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 3(9): 73-86.



© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.